

Global soil engineering effects  
of termites, ants and earthworms

# ——全球土壤无脊椎动物工程师效应

巫东豪

浙江大学“百人计划”研究员

生命科学学院生态研究所

[donghao\\_ecology@zju.edu.cn](mailto:donghao_ecology@zju.edu.cn)



巫东豪 浙江大学生命科学学院 百人计划研究员

## 研究领域

- 群落生态学；地下生态学
- 生物多样性与生态系统功能
- 分解作用与全球变化
- 岛屿生物地理学与生境片段化

## 论文发表

2025 | Nature ( $IF_5 = 54.4$ )

2025 | Journal of Ecology ( $IF_5 = 6.1$ )

2024 | One Earth ( $IF_5 = 18.1$ )

2023 | Soil Biology and Biochemistry ( $IF_5 = 10.4$ )

2022 | Journal of Applied Ecology ( $IF_5 = 6.5$ )

2021 | Ecography ( $IF_5 = 6.7$ )

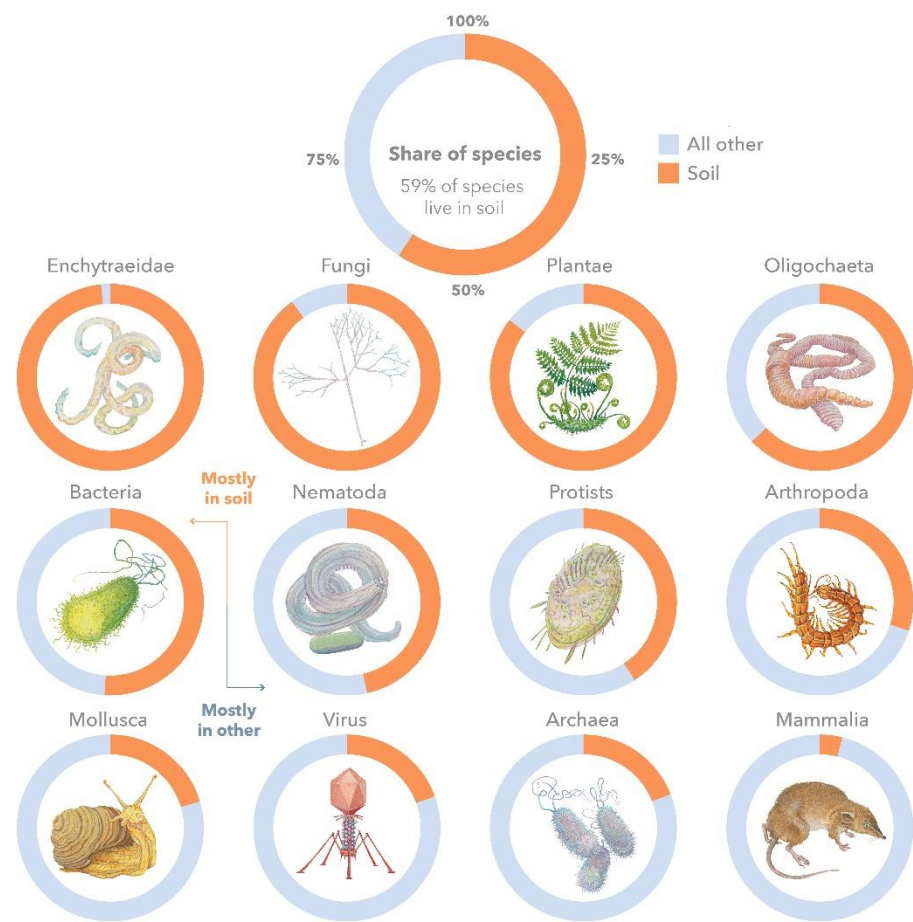
## 基金项目

2026-2028 基金委青年基金项目C类

2026-2028 浙江省自然科学基金青稞项目

**为什么要关注土壤？**

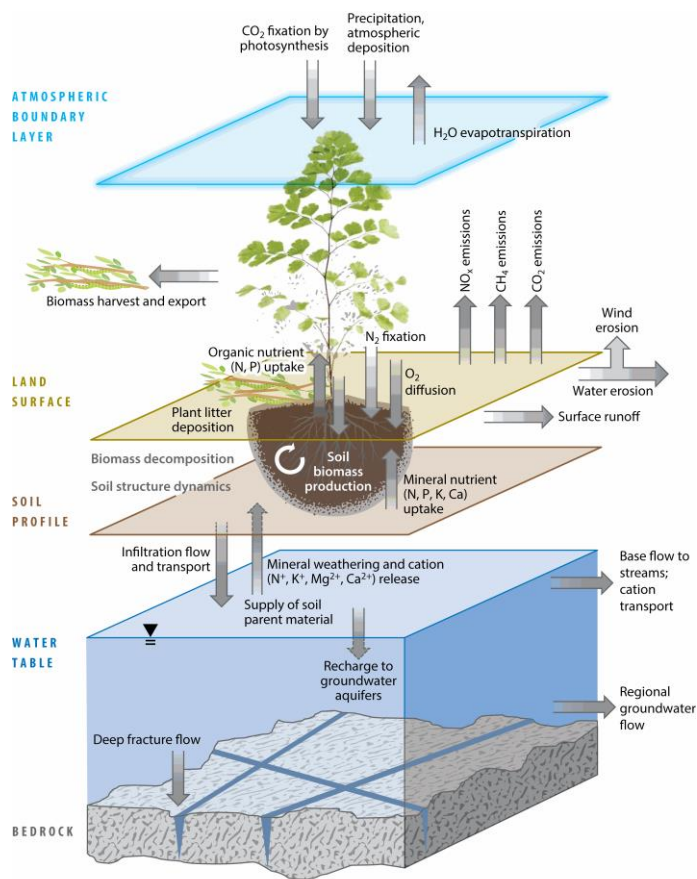
# 土壤是支撑生物多样性的关键要素



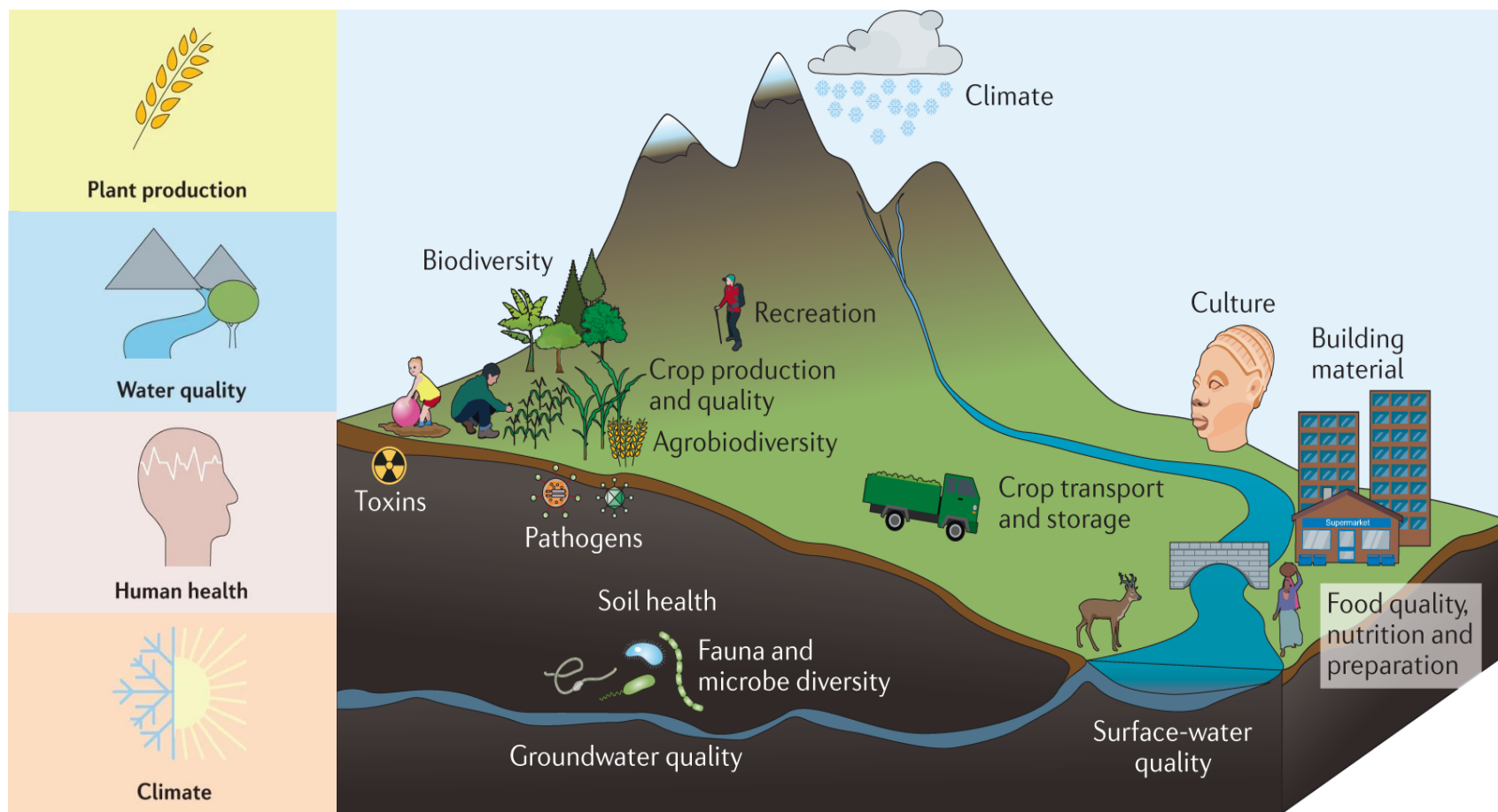
约59%陆地生物的（整个或部分）生活史在土壤中完成

Anthony et al. 2023 (PNAS)

# 土壤是支撑陆地生态系统的关键要素



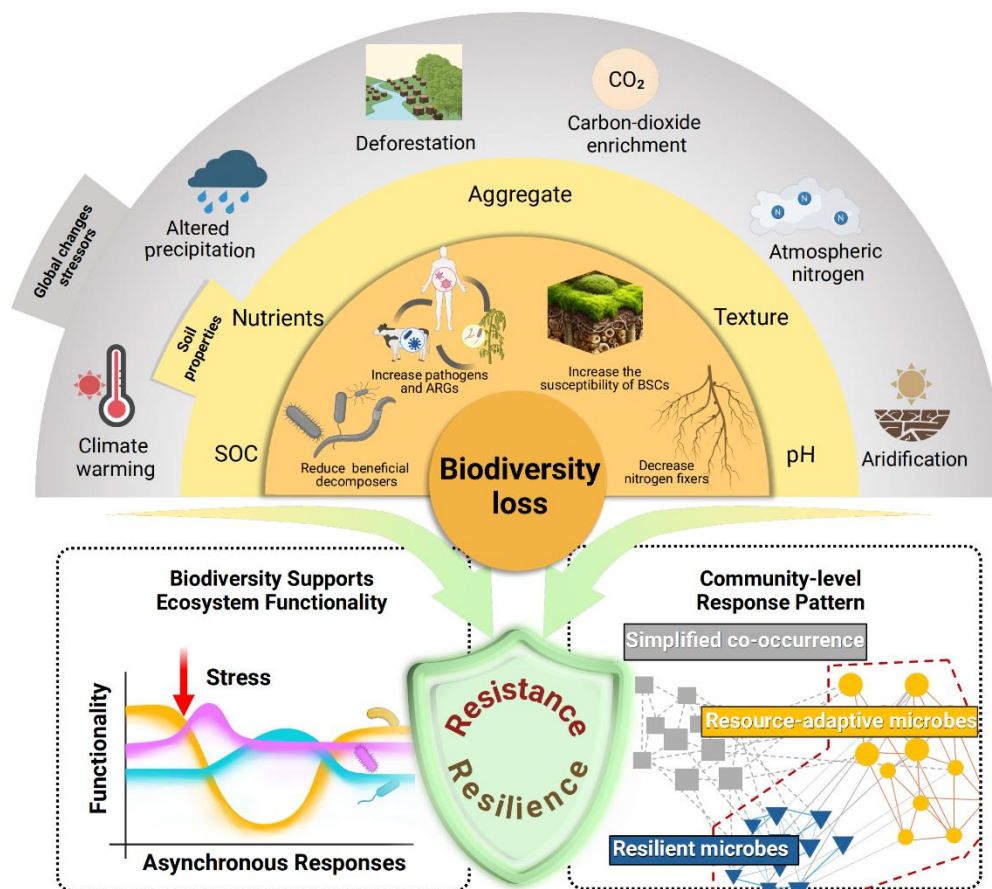
Banwart SA, et al. 2019. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 47:333-59



**土壤连接了大气、水体、生物等多个圈层，提供食物、水质、健康和气候调节等多种服务**

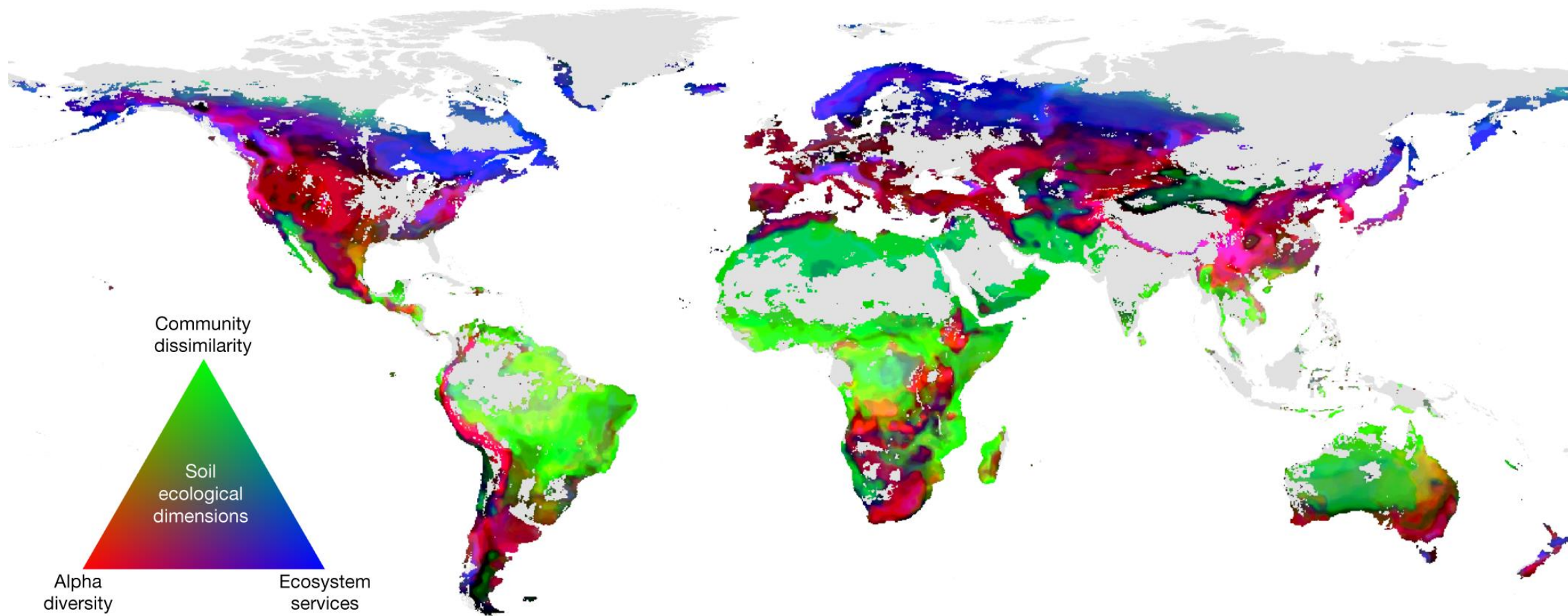
Banwart et al. 2019 (Annual Review of Earth and Planetary Sciences); Lehmann et al. 2020 (Nature Reviews Earth & Environment)

# 全球变化正威胁土壤生物多样性和功能



土壤生物多样性丧失和功能群变化深刻影响生态系统稳定性乃至人类健康

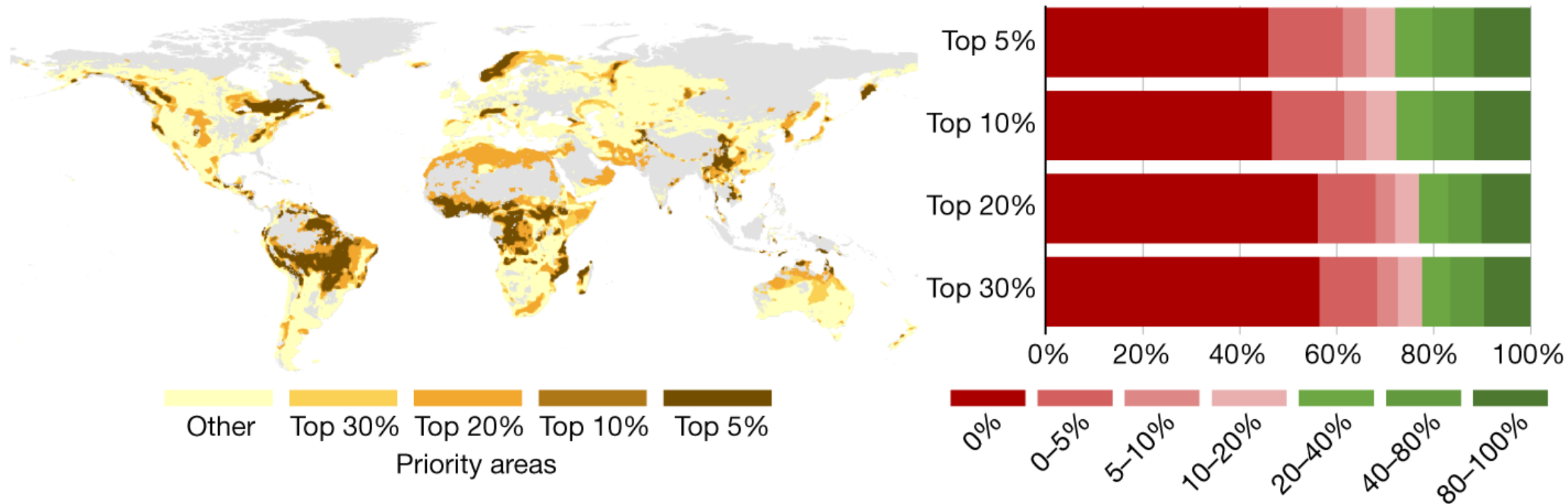
# 全球土壤自然状态热点地区评估



土壤自然状态的三类主要指标——Alpha多样性、Beta多样性、生态系统多功能性

Guerra et al. 2022 (Nature)

# 全球土壤自然状态热点地区缺乏保护



超过70%的土壤自然状态热点地区不在保护区之内

**对于缺乏保护的生态系统而言**

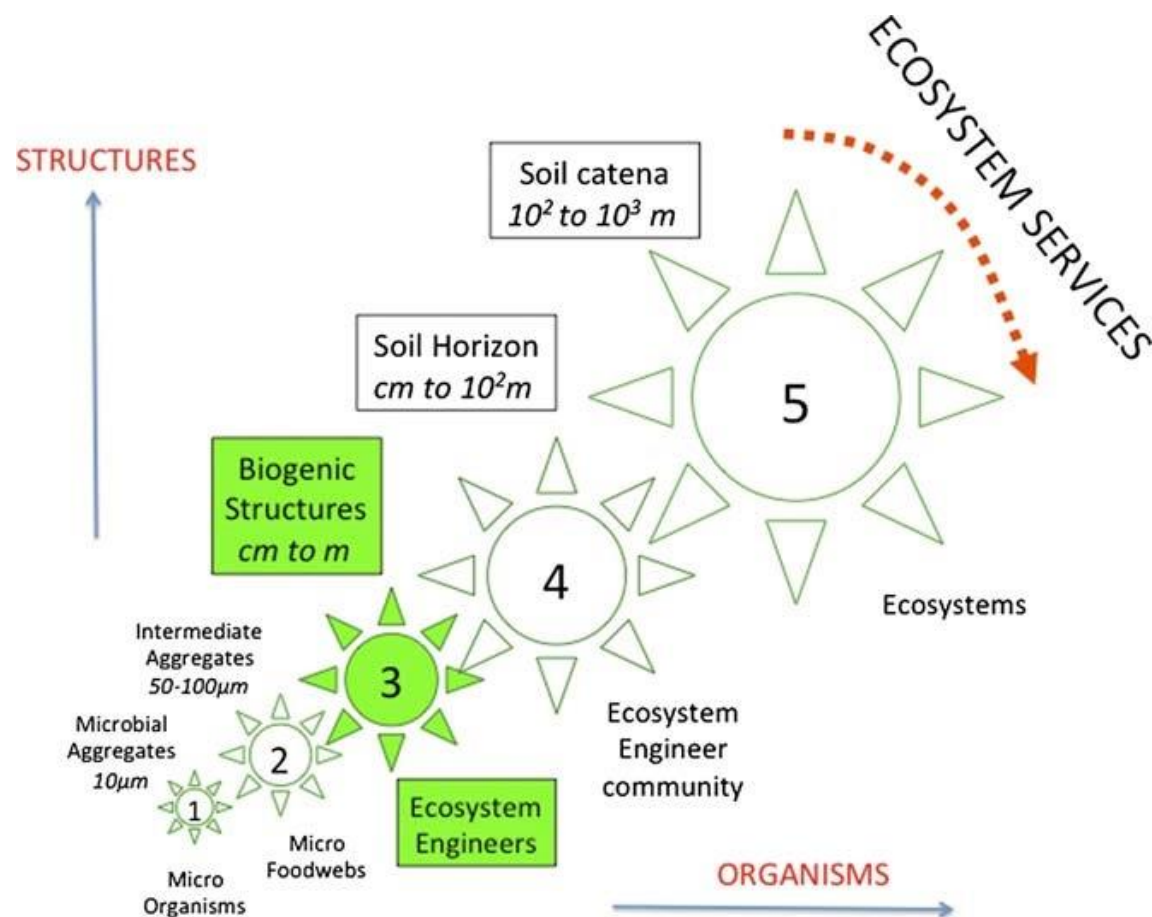
**在全球变化背景下**

**土壤自然状况是否无法自行维持稳定？**

# 土壤是自组织系统

Biogenic structures  
生物构造

Ecosystem engineers  
生态系统工程师

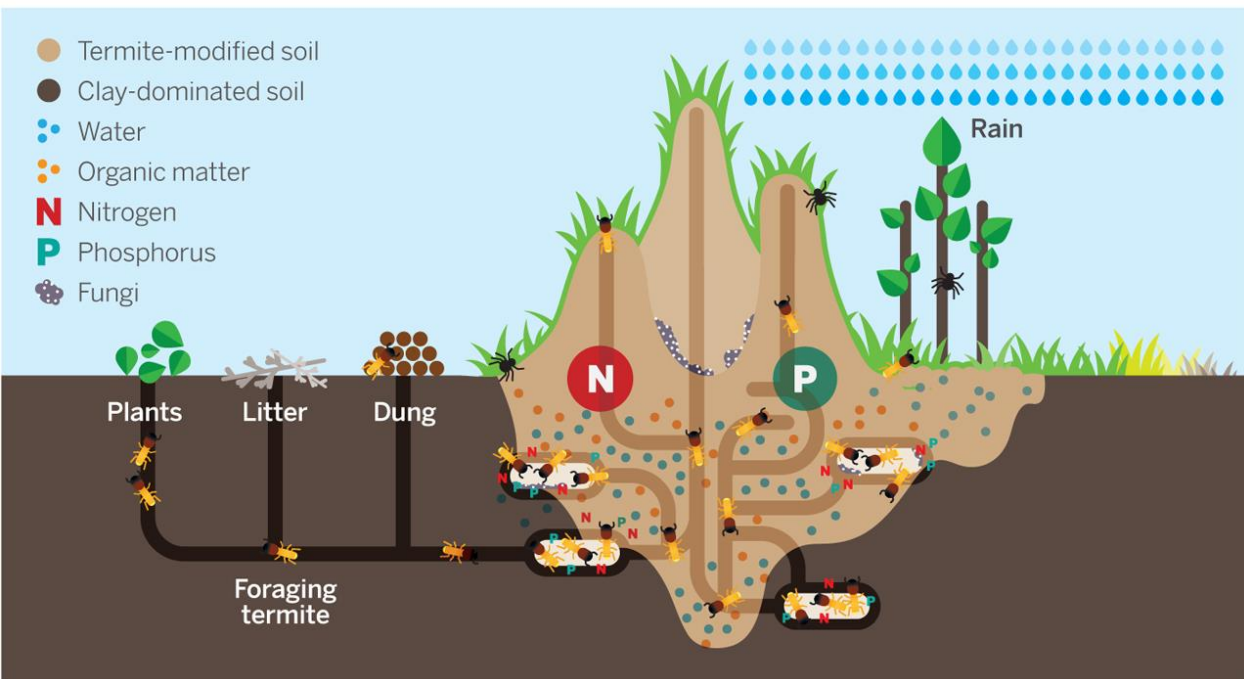


在生态系统工程师塑造下，土壤结构和生态系统功能在多个空间尺度上具有自组织现象，呈现“涌现”特征

# 经典案例——非洲稀树草原的白蚁丘

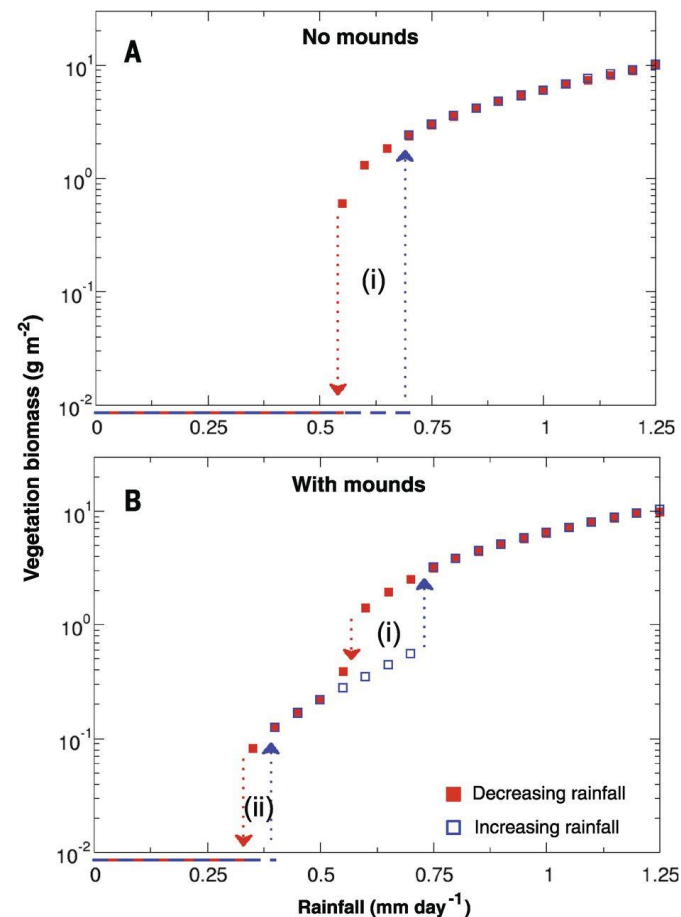
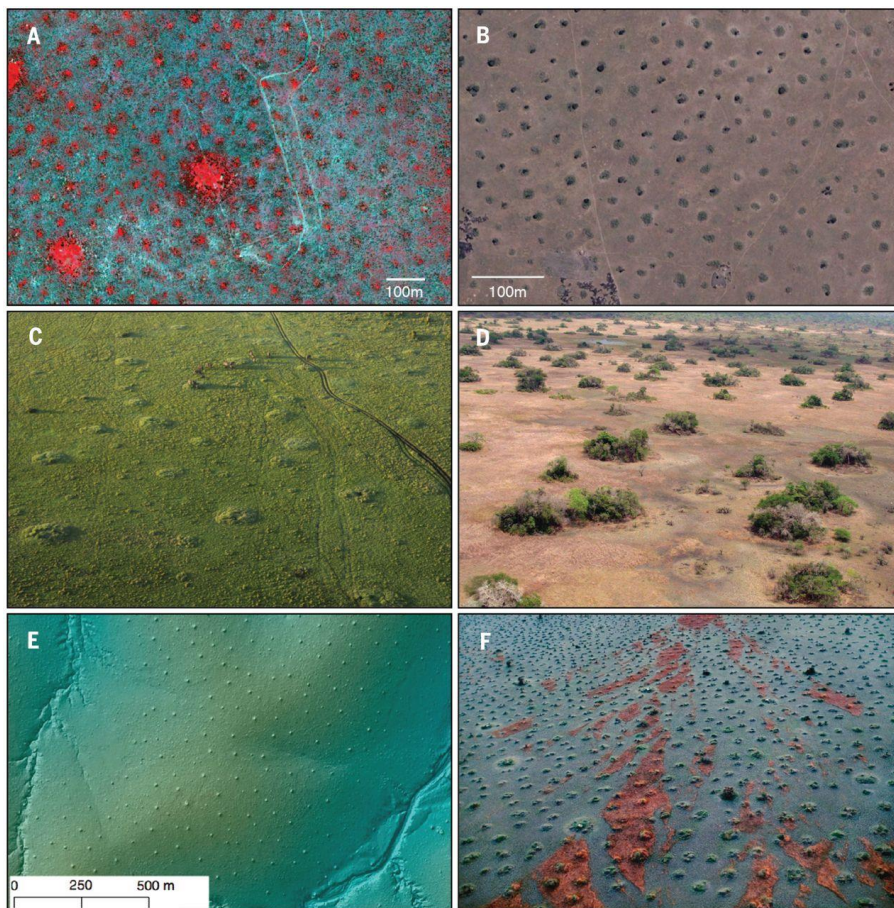
## Nutrient islands

Foraging termites concentrate plant material in mounds, where fungi process it into soil-enriching nitrogen, phosphorus, and organic material, fostering more plant and animal growth. Mounds also retain water better than surrounding soil.



在环境条件恶劣的稀树草原，白蚁丘是许多生物种类栖息和觅食的重要生境

# 白蚁丘显著增强旱区生态系统抵御极端干旱事件的能力

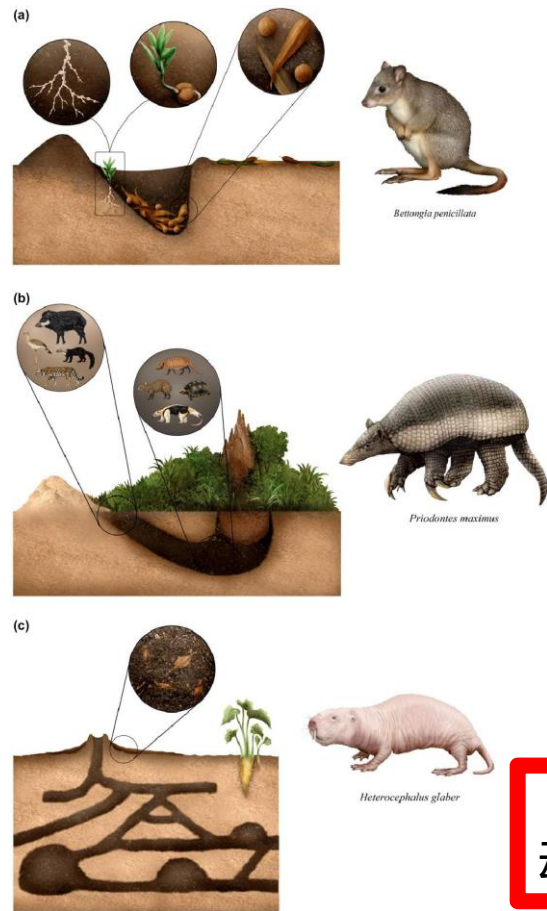
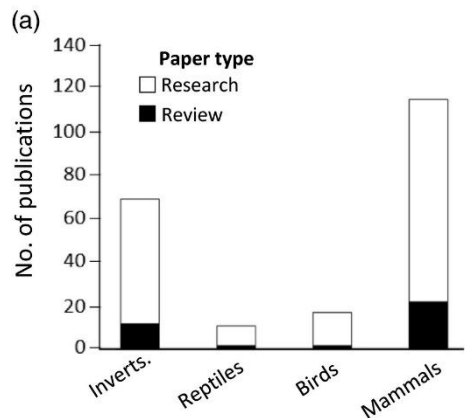


白蚁丘离散式分布提高生境异质性，改善局域生境养分、水分等条件，为极端干旱下植物生存创造可能性

**具有土壤扰动功能的生物类群**

**其多样性和重要性并未受到广泛关注**

# 对生态系统工程师多样性的认知仅为冰山一角

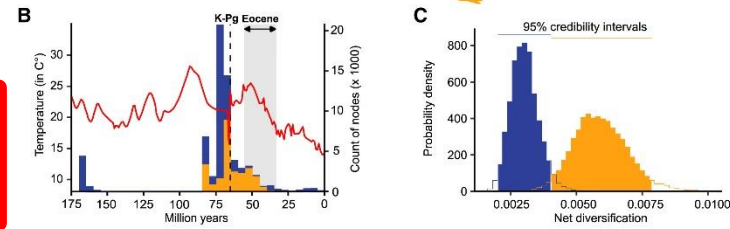
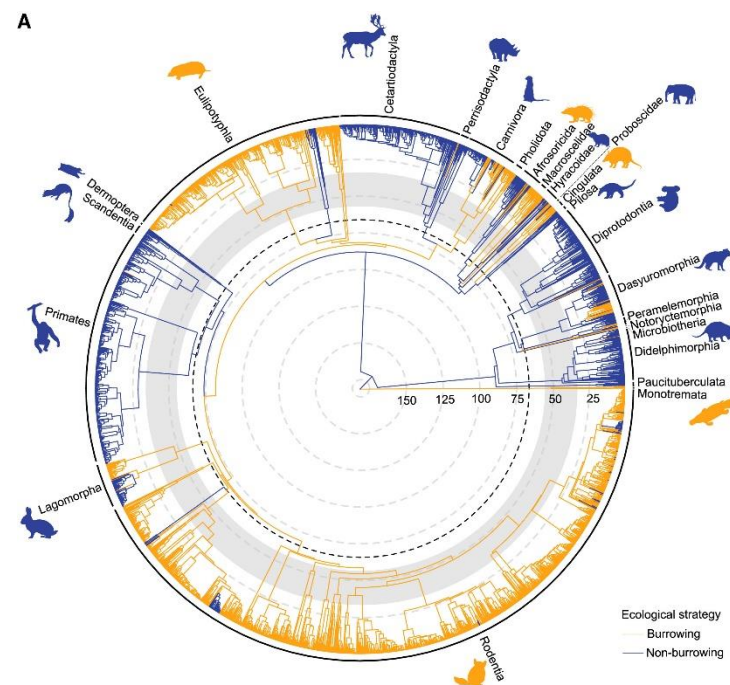


**Estimated species vs. named engineers**

	Estimated species: 1,203,375 Total named engineers: 36
	Estimated species: 8,240 Total named engineers: 5
	Estimated species: 9,956 Total named engineers: 13
	Estimated species: 5,416 Total named engineers: 68

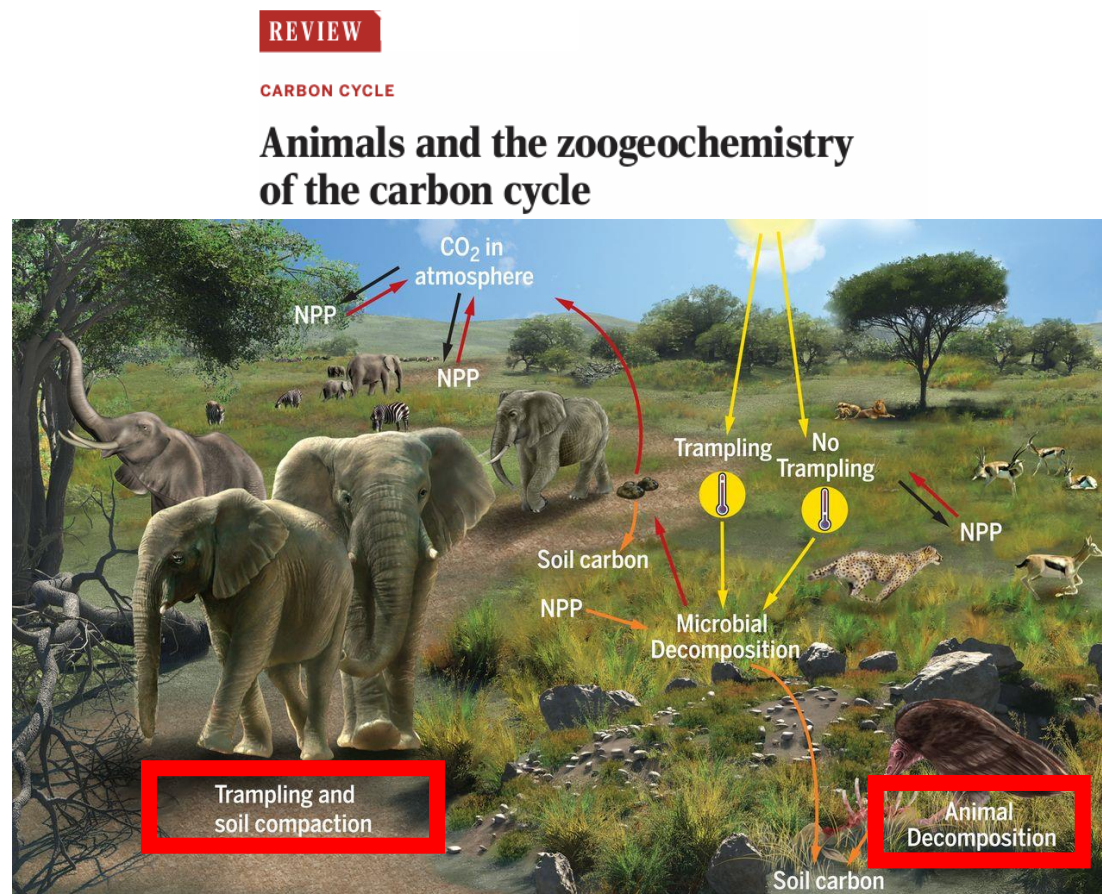
近年新增  
68 → 869

41%陆生哺乳  
动物有掘土行为



已命名的工程师物种，远低于已知的生物多样性

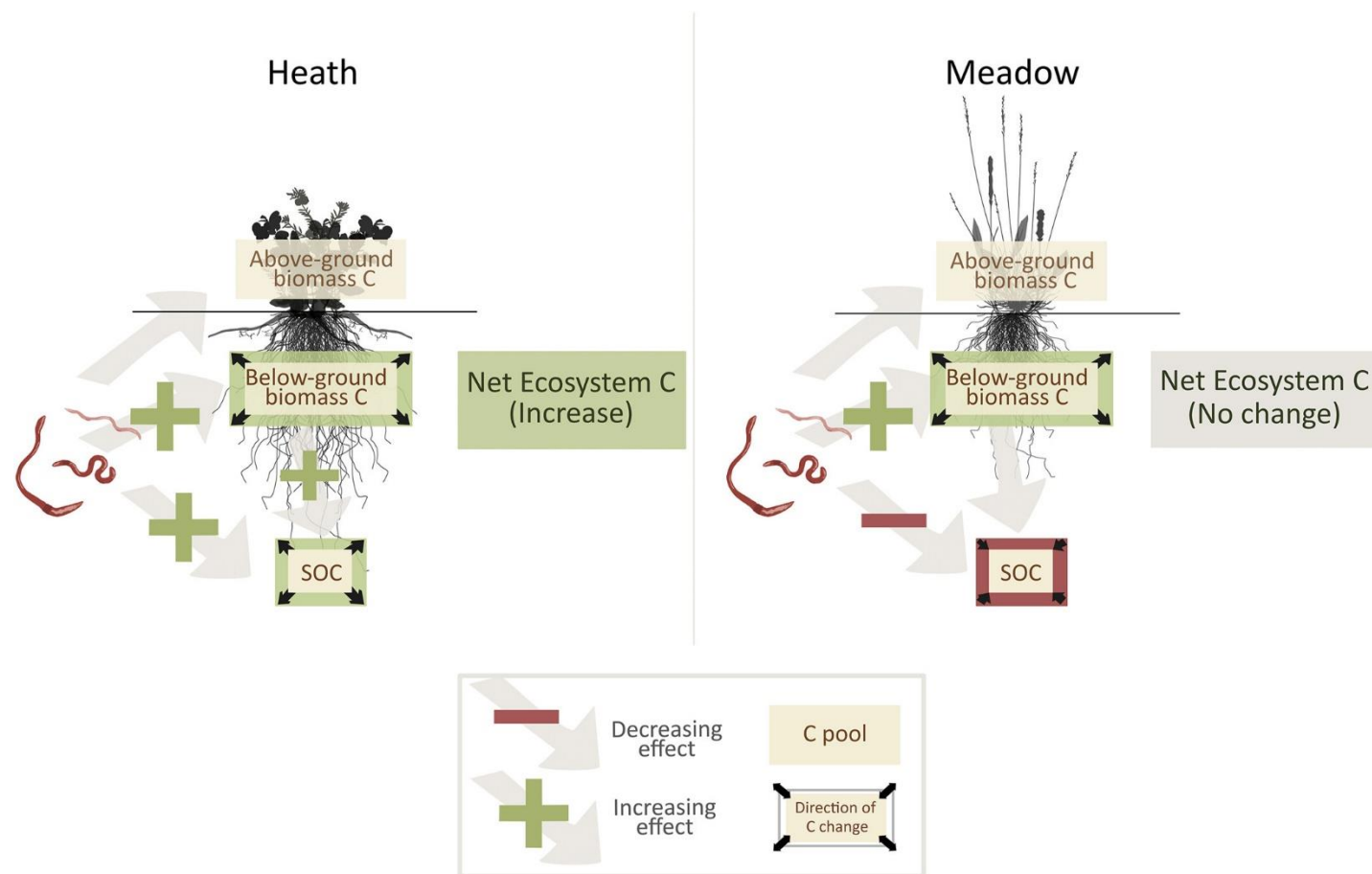
# 土壤扰动作用未被纳入主流研究框架



动物对地下的扰动过程并未被纳入碳循环模型

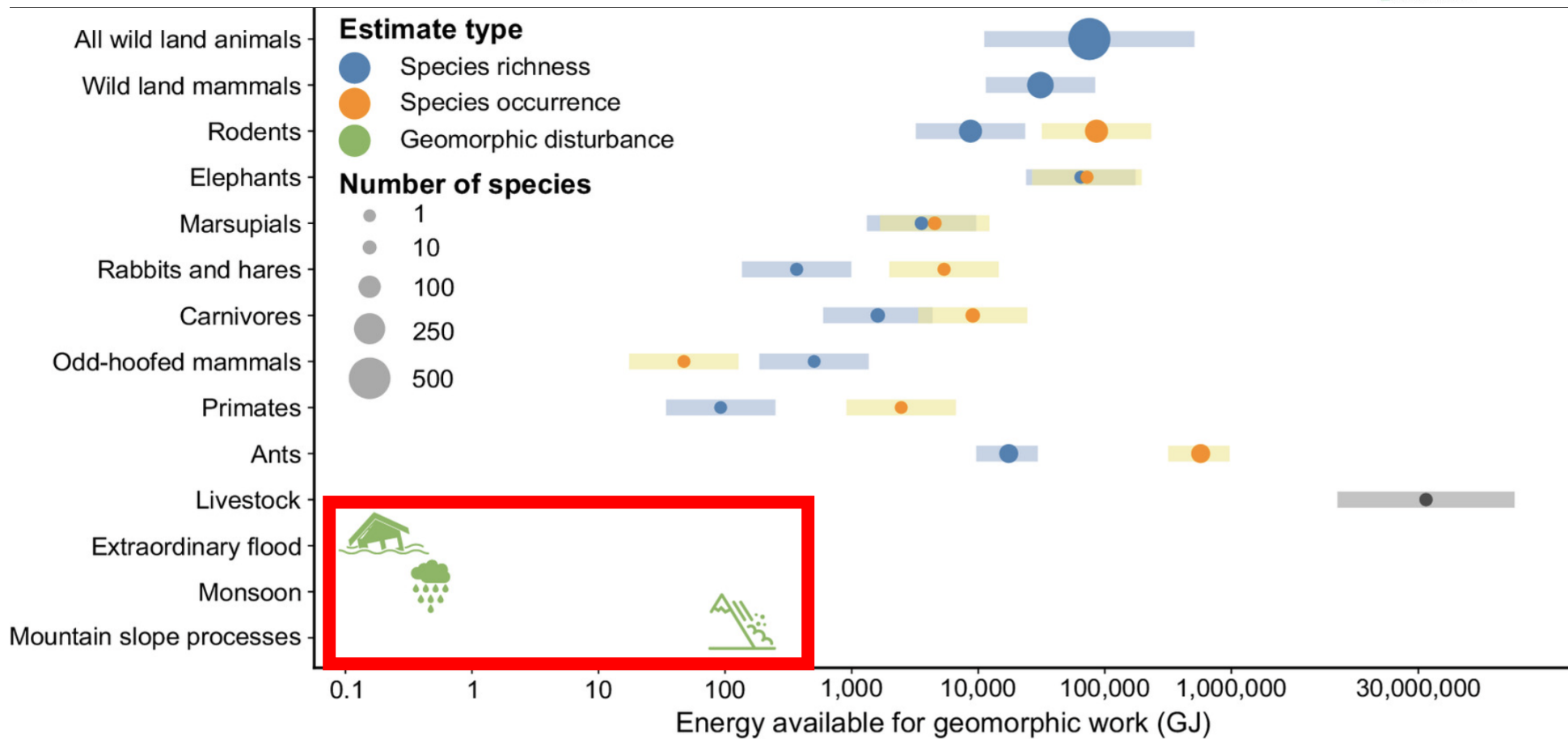
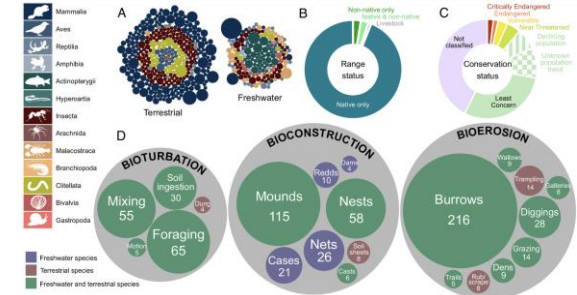
Schmitz et al. 2018 (Science)

# 迷思：土壤扰动作用仅是重塑物质能量分布，不能提升整体水平？



蚯蚓对根系碳的促进效应强于对土壤有机碳的分解释放，最终提升灌丛碳库，对草原碳库净效应为零

# 真相：土壤扰动动物对全球地貌塑造作用远超想象

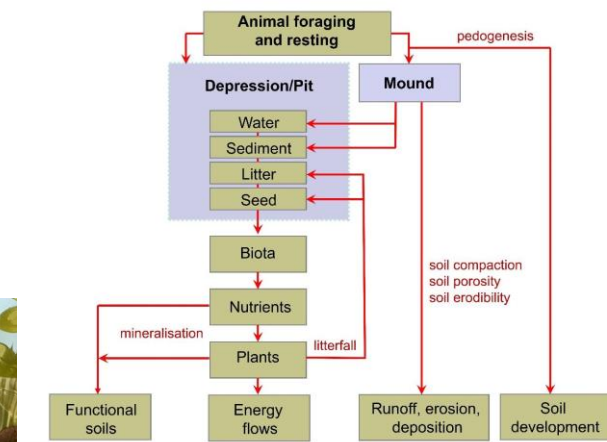


按保守估计，动物仅投入1%能量进行土壤扰动，其总量(= 76,000 GJ)也远超成百上千次极端洪灾的威力

**既然土壤扰动作用如此普遍**

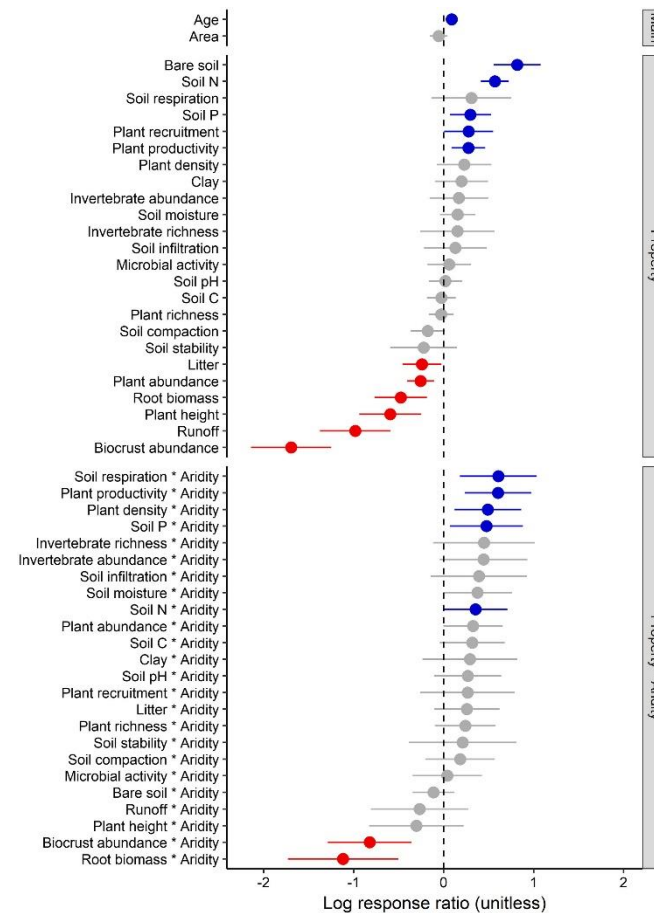
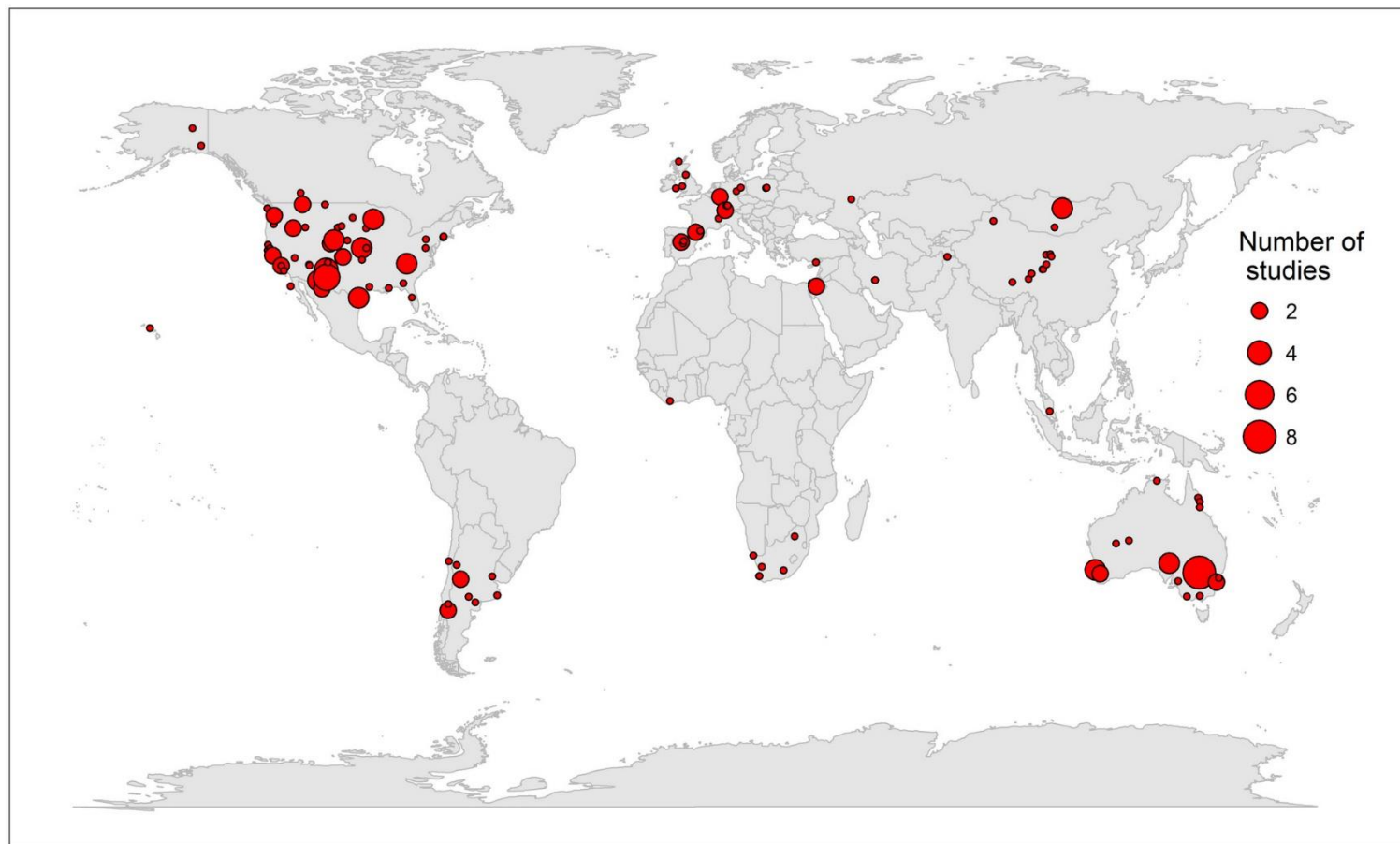
**应该如何定量评估土壤扰动动物的重要性？**

# 动物扰动对土壤、其他生物类群和生态过程的影响



通过对比扰动土和对照土（即有/无生态系统工程师）的多种功能属性，可以定量评估土壤扰动作用

# 此前研究更加关注脊椎动物的土壤扰动作用

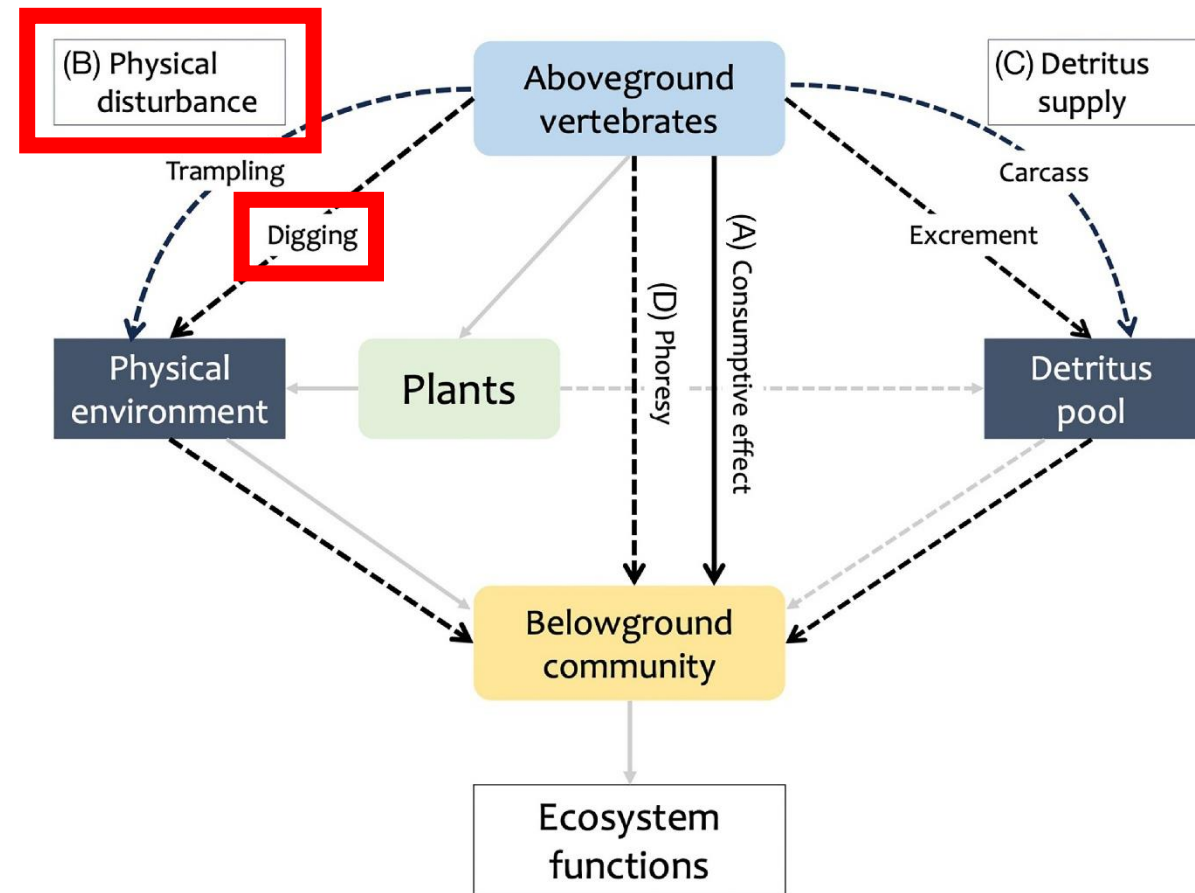


脊椎动物的土壤扰动作用显著提升土壤氮磷含量、植物生产力和募员率，且干旱程度会改变其工程师效应

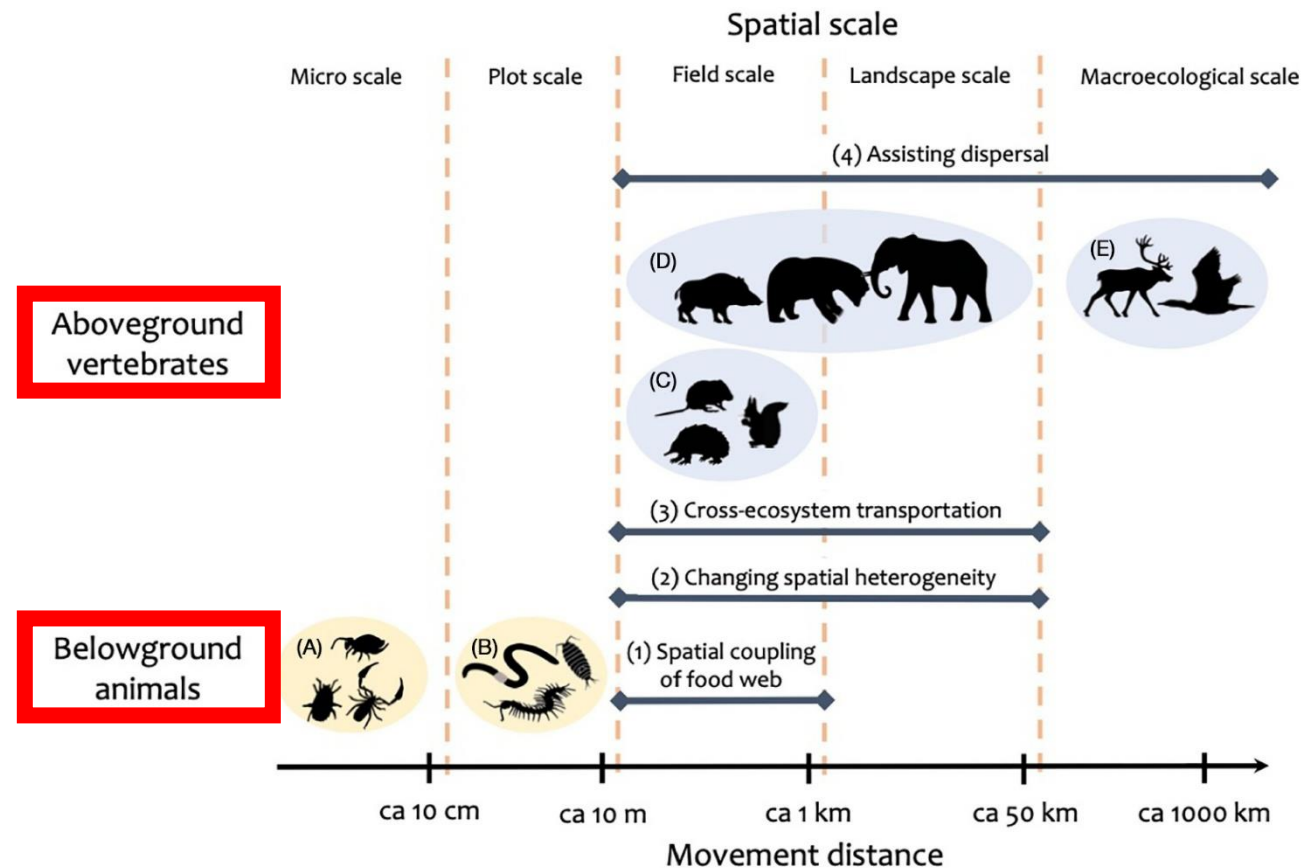
# 最新综述呼吁重视脊椎动物的土壤扰动作用

Opinion

The underappreciated roles of aboveground vertebrates on belowground communities



Trends in Ecology &amp; Evolution



Trends in Ecology &amp; Evolution

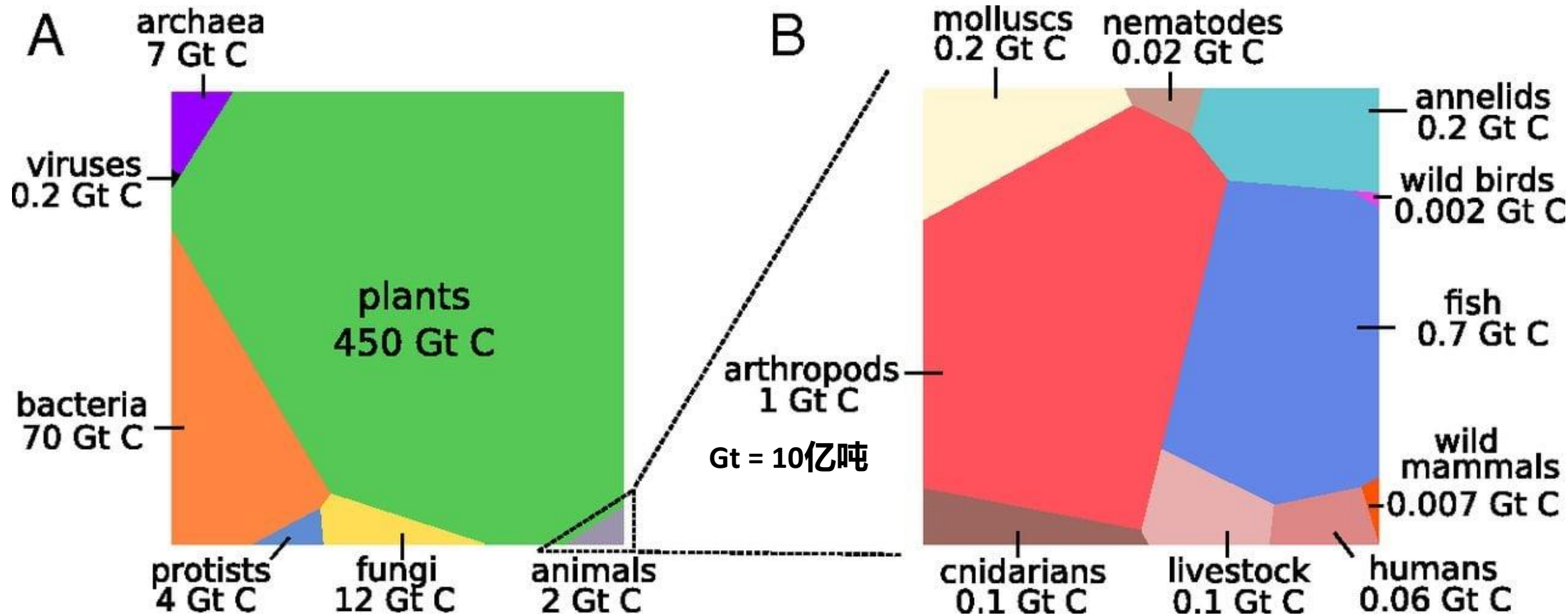
然而，该综述仅将无脊椎动物视作被影响者，片面强调了脊椎动物的作用

Tomita et al. 2025 (Trends in Ecology & Evolution)

**无脊椎动物的体型和空间活动范围小于脊椎动物**

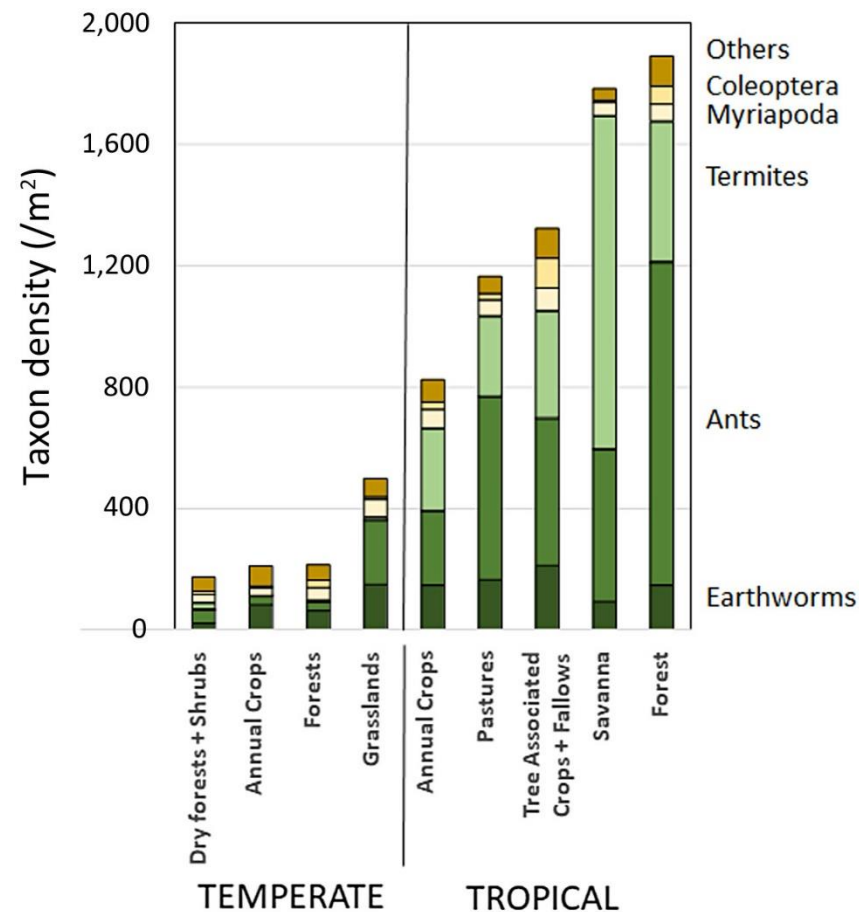
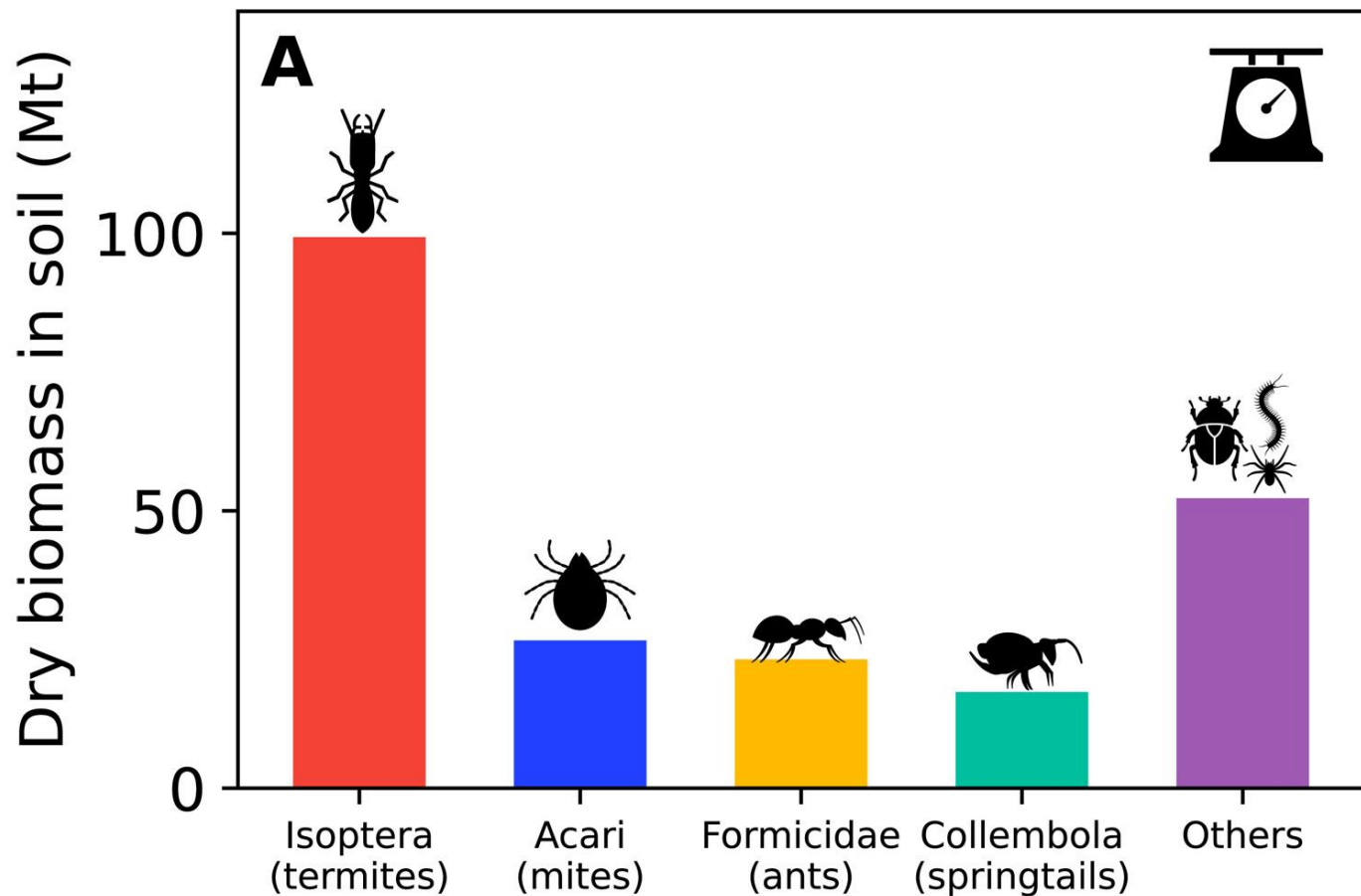
**是否意味着无脊椎动物的土壤扰动作用可忽略不计？**

# 全球无脊椎动物的总生物量超过脊椎动物



陆生节肢动物 (0.2Gt) > 陆生脊椎动物 (0.109Gt)

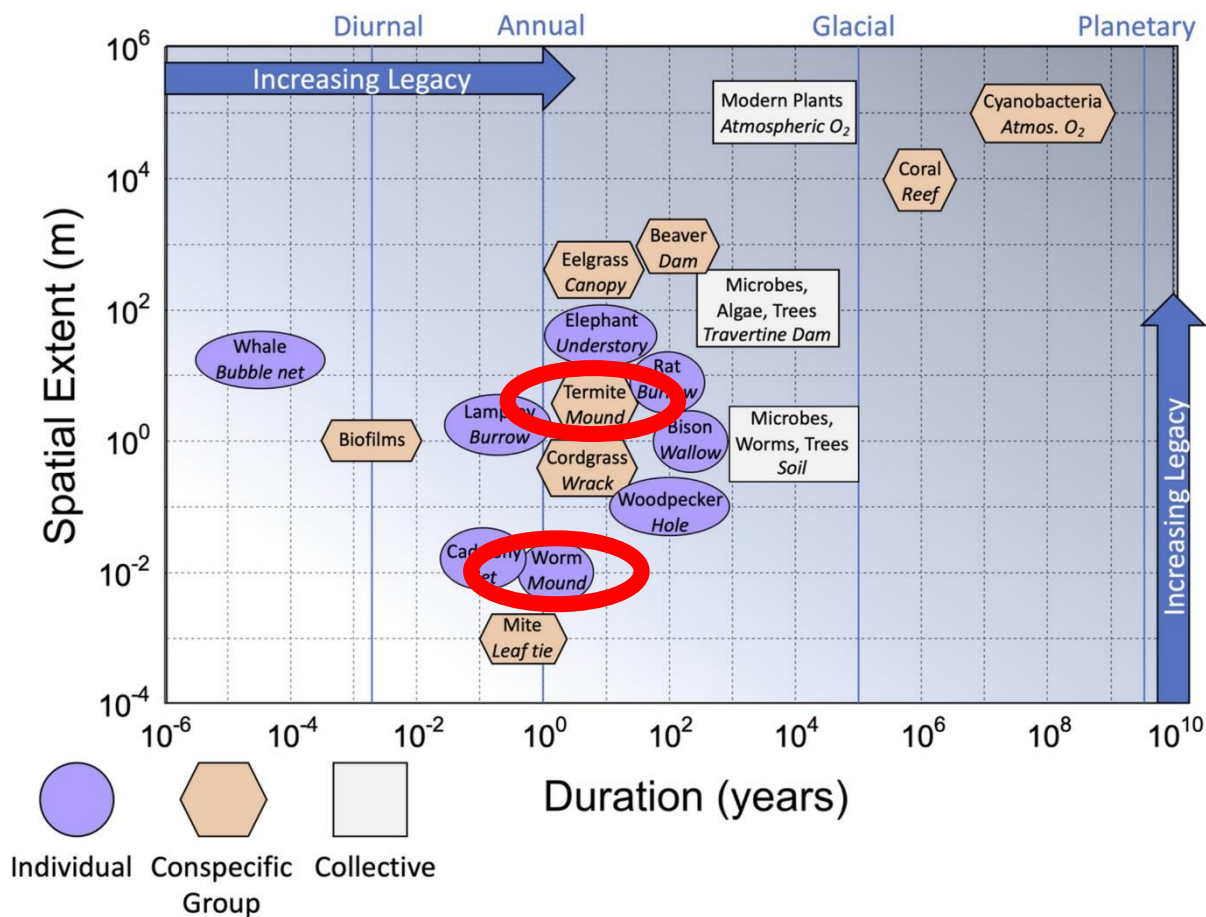
# 白蚁、蚂蚁和蚯蚓在无脊椎动物群落中的生态优势



(1) 生物量：白蚁和蚂蚁占土壤节肢动物的40%和10%； (2) 多度：蚂蚁、白蚁、蚯蚓是土壤大型无脊椎动物的前三名

# 土壤生物构造的时间维度和空间维度

Biogenic structures  
生物构造



土壤无脊椎动物如白蚁、蚂蚁和蚯蚓所产生的“生物构造”可存续数年，持续影响着周围空间

# 以往研究的不足之处



ELSEVIER

Soil Biology and Biochemistry  
Volume 176, January 2023, 108868

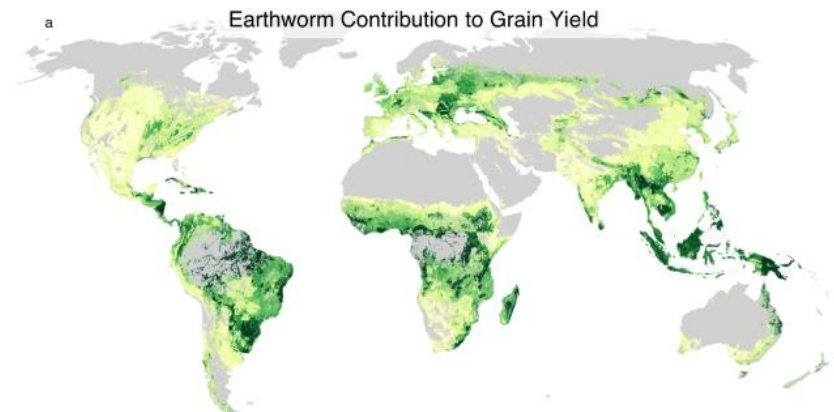
## Termite bioturbation: Fungal versus non-fungal building strategies lead to different soil sheeting stability



ELSEVIER

Earth-Science Reviews  
Volume 213, February 2021, 103469

## Ants as geomorphological agents: A global assessment



nature communications

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

[nature](#) > [nature communications](#) > [articles](#) > article

Article | [Open access](#) | Published: 26 September 2023

## Earthworms contribute significantly to global food production

(1) 缺乏全球尺度研究; (2) 仅聚焦少数生态系统功能; (3) 尚无多类群对比; (4) 生物地理格局的驱动机制不明

Jouquet et al. 2023 (Soil Biology and Biochemistry); Viles et al. 2021 (Earth-Science Reviews); Fonte et al. 2023 (Nature Communications)

# 危机已现……土壤动物锐减与生态系统退化

**nature**

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

nature > articles > article

Article | Published: 06 August 2025

**Stronger El Niños reduce tropical forest arthropod diversity and function**

ELSEVIER

Science of The Total Environment

Volume 946, 10 October 2024, 173822

Review

**A global meta-analysis reveals a consistent reduction of soil fauna abundance and richness as a consequence of land use conversion**

## Current Biology

Volume 33, Issue 20, 23 October 2023, Pages 4538-4547.e5

Report

## Ecosystem consequences of invertebrate decline

**PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B**

BIOLOGICAL SCIENCES

Open Access

Check for updates

Research articles

**Decline in diversity of tropical soil fauna under experimental warming**

View PDF

**Global Change Biology**

RESEARCH ARTICLE | Full Access

**Meta-analysis reveals that the effects of precipitation change on soil and litter fauna in forests depend on body size**

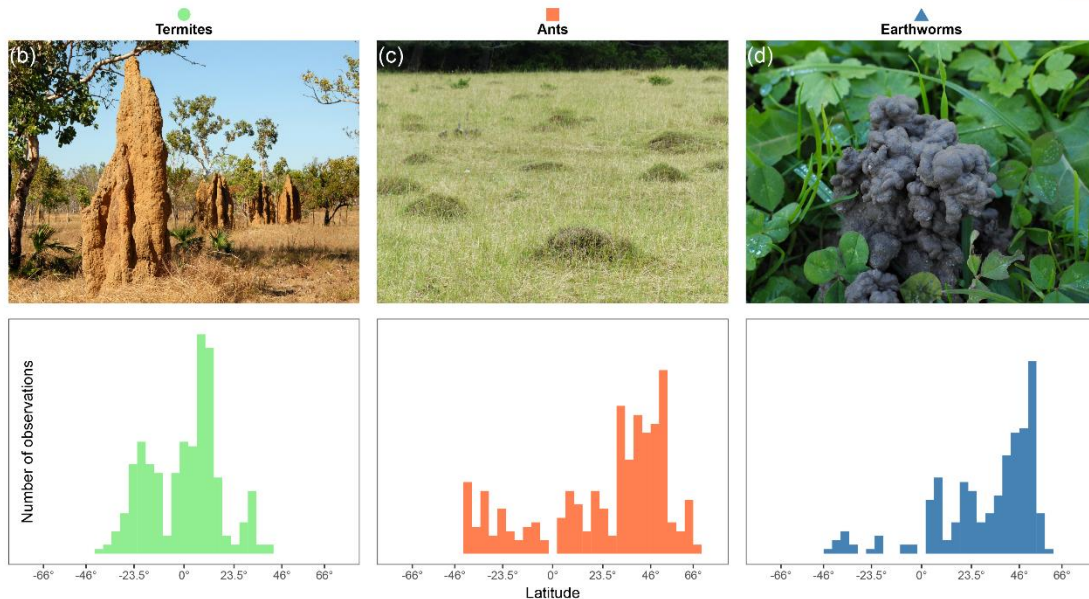
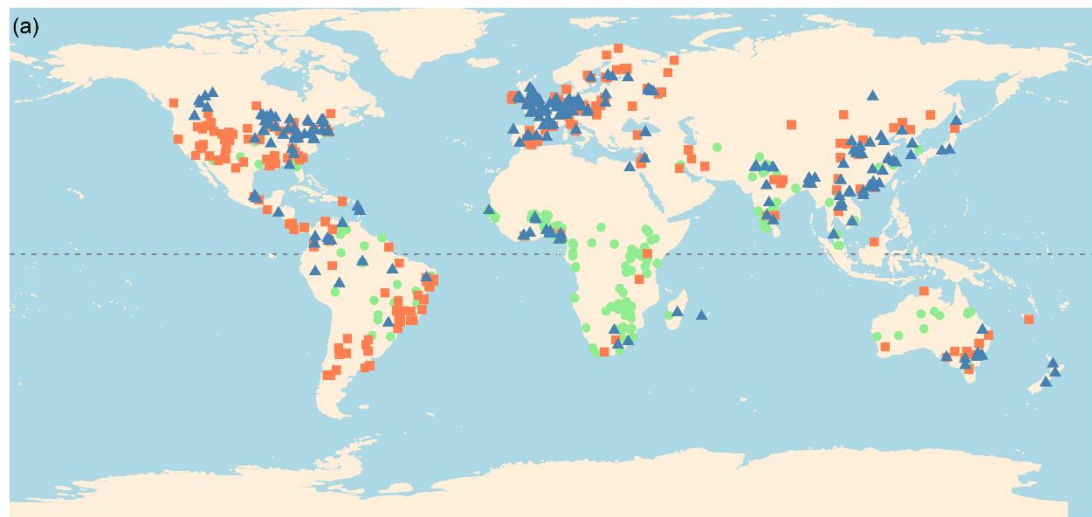
**全球变暖、干旱、土地利用变化均导致土壤动物多样性和生物量下降，不利于生态系统多功能性维持**

Szczygieł et al. 2024 (Proceedings of the Royal Society B); Sharp et al. 2025 (Nature); Martin et al. 2024 (Global Change Biology); Chiappero et al. 2024 (Science of the Total Environment); Eisenhauer et al. 2023 (Current Biology)

**评估全球土壤无脊椎动物工程师效应已势在必行**

# 历时一年多.....全球首个土壤无脊椎动物工程师效应数据集

**数据集简介**  
12,975条记录  
967篇文献  
406个物种  
47项生态系统功能



白蚁丘

蚂蚁丘

蚯蚓粪

## 工程师效应公式

对数响应比

$$y_i = \ln R = \ln \frac{Y_e}{Y_c}$$

标准差作为权重系数

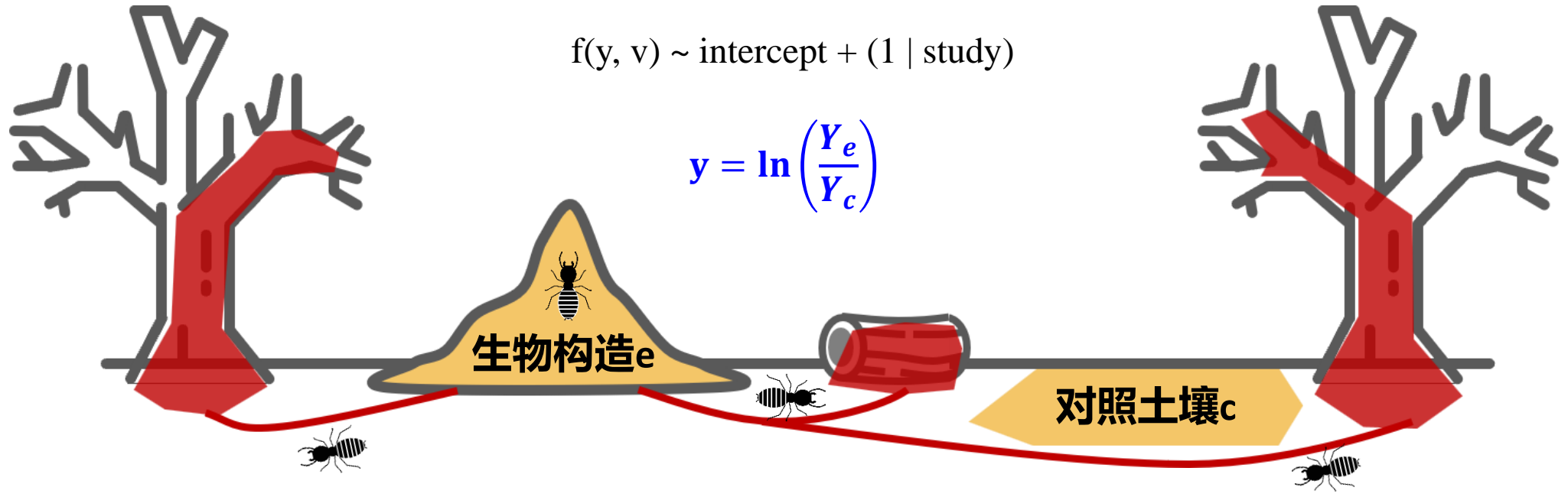
$$V_i = \frac{S_e^2}{N_e Y_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c Y_c^2}$$

样本量作为权重系数

$$V_i = \frac{N_e \times N_c}{N_e + N_c}$$

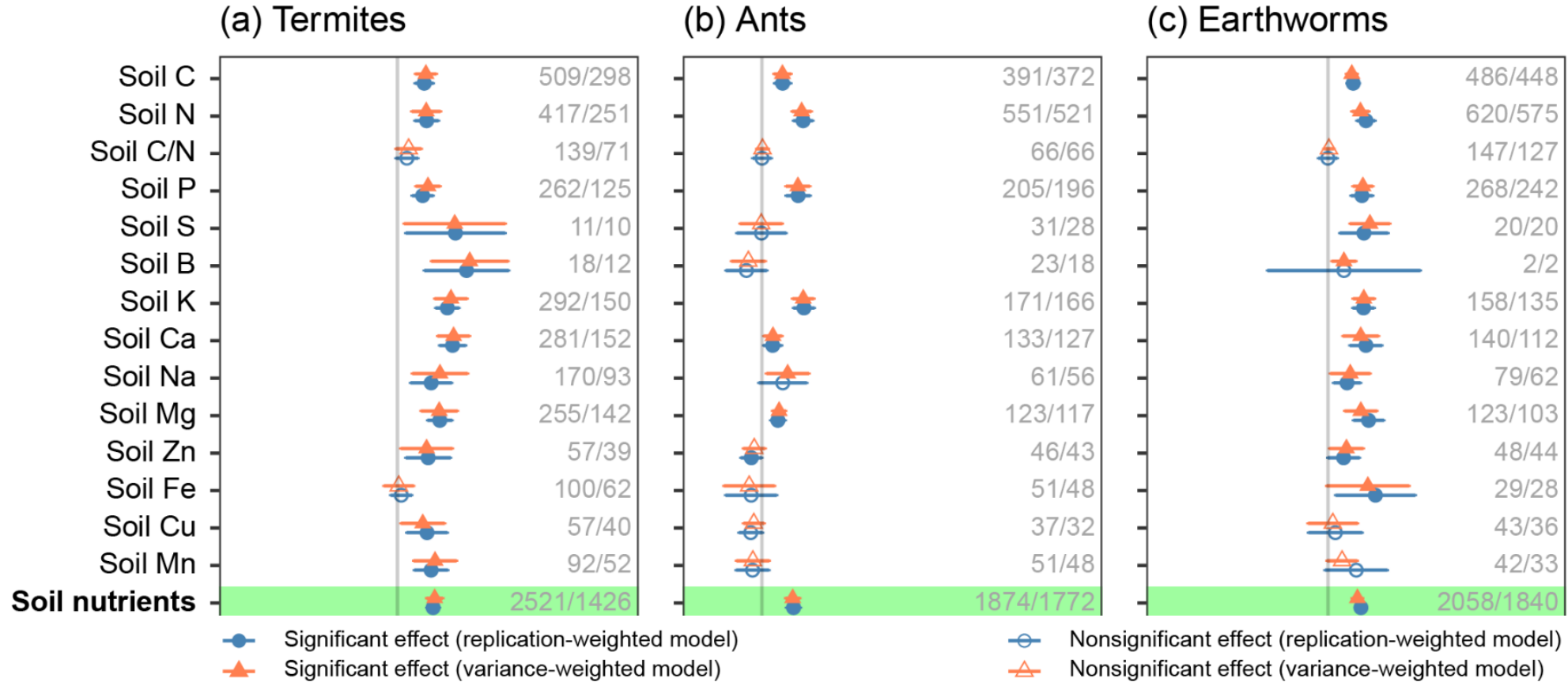
R语言metafor包

# 问题一：生态系统工程师效应的全球尺度评估



土壤无脊椎动物的土壤扰动作用能否改善土壤元素含量等生态系统功能?

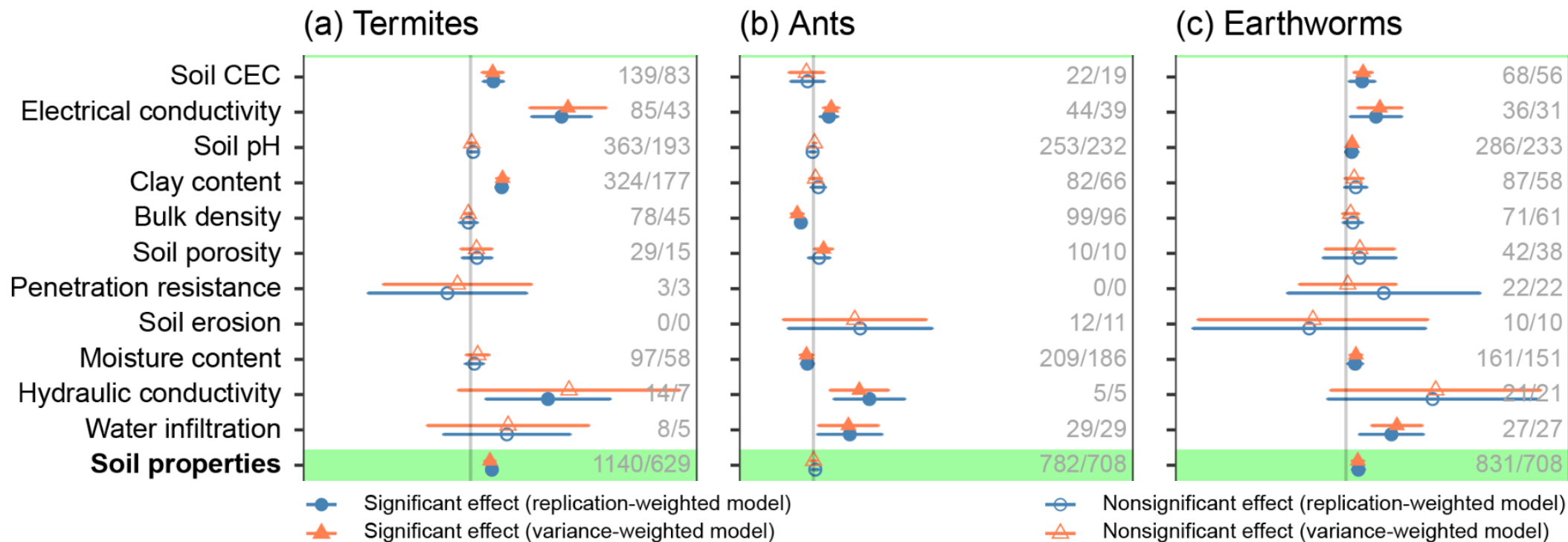
# 问题一：生态系统工程师效应的全球尺度评估



Nutrients

三个土壤动物类群均显著提升土壤主要营养元素含量(+16%~123%)

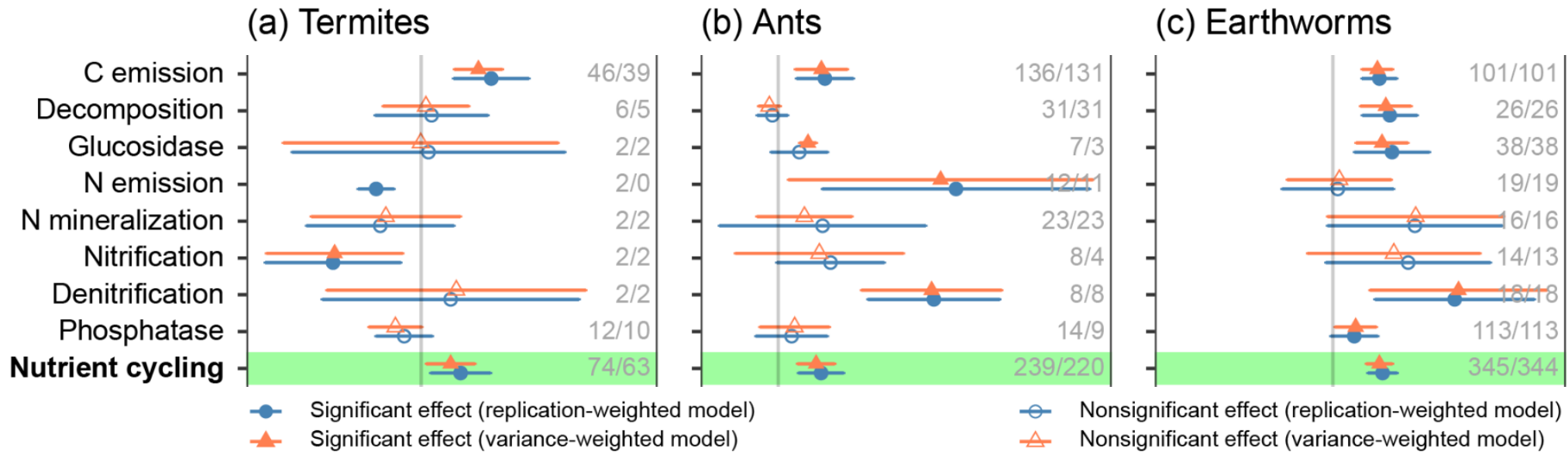
# 问题一：生态系统工程师效应的全球尺度评估



Soil properties

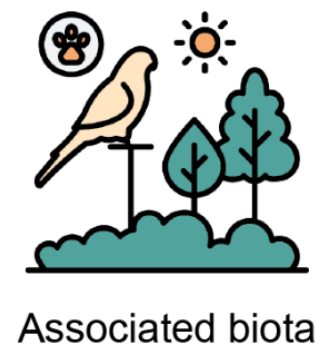
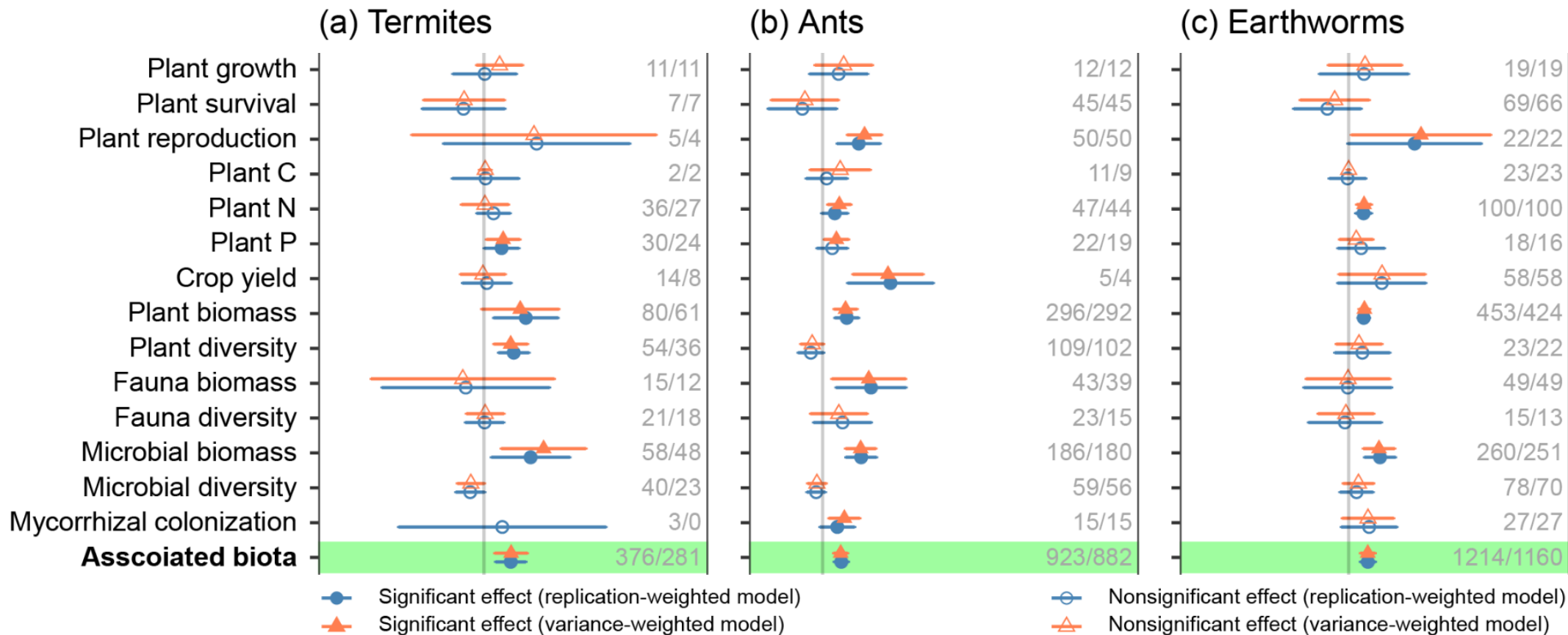
三个土壤动物类群均显著提升土壤电导率(+29%~341%)

# 问题一：生态系统工程师效应的全球尺度评估



三个土壤动物类群均显著提升土壤呼吸(+68%~131%)

# 问题一：生态系统工程师效应的全球尺度评估

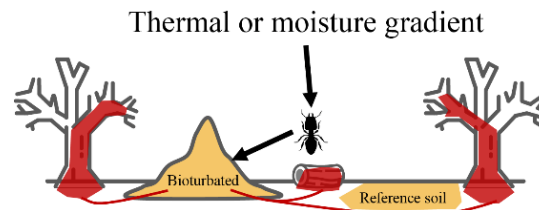
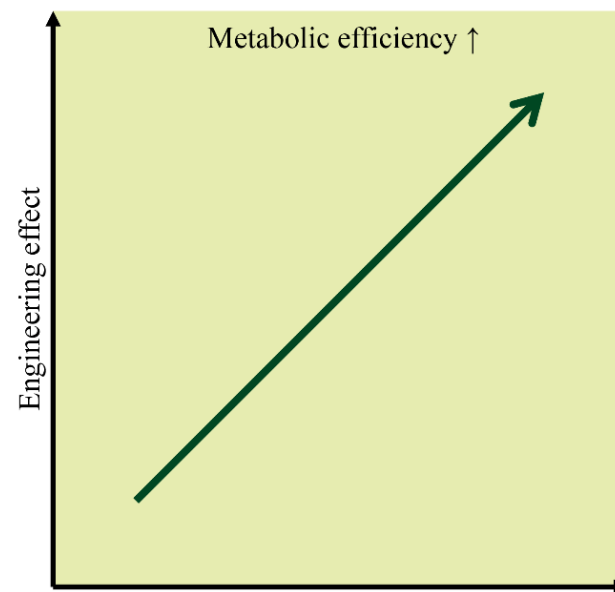
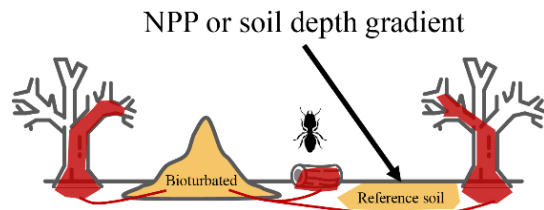
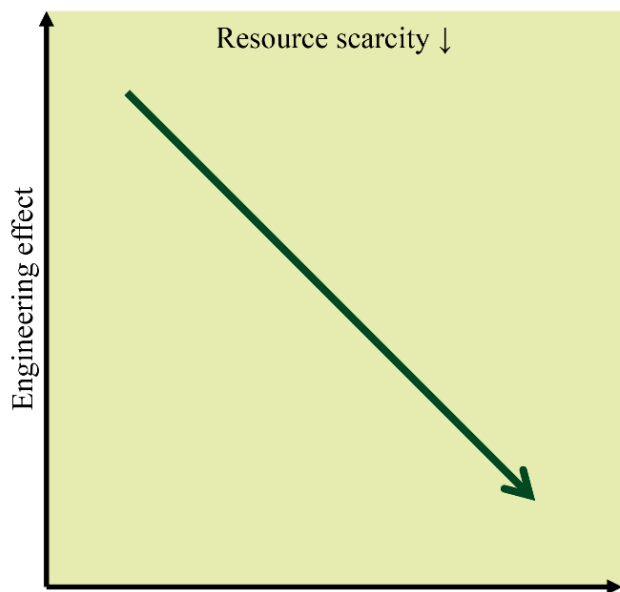


三个土壤动物类群均显著提升植物生物量(+21%~75%)、微生物生物量(+45%~151%)

# 问题二：工程师效应地理格局的驱动机制解析

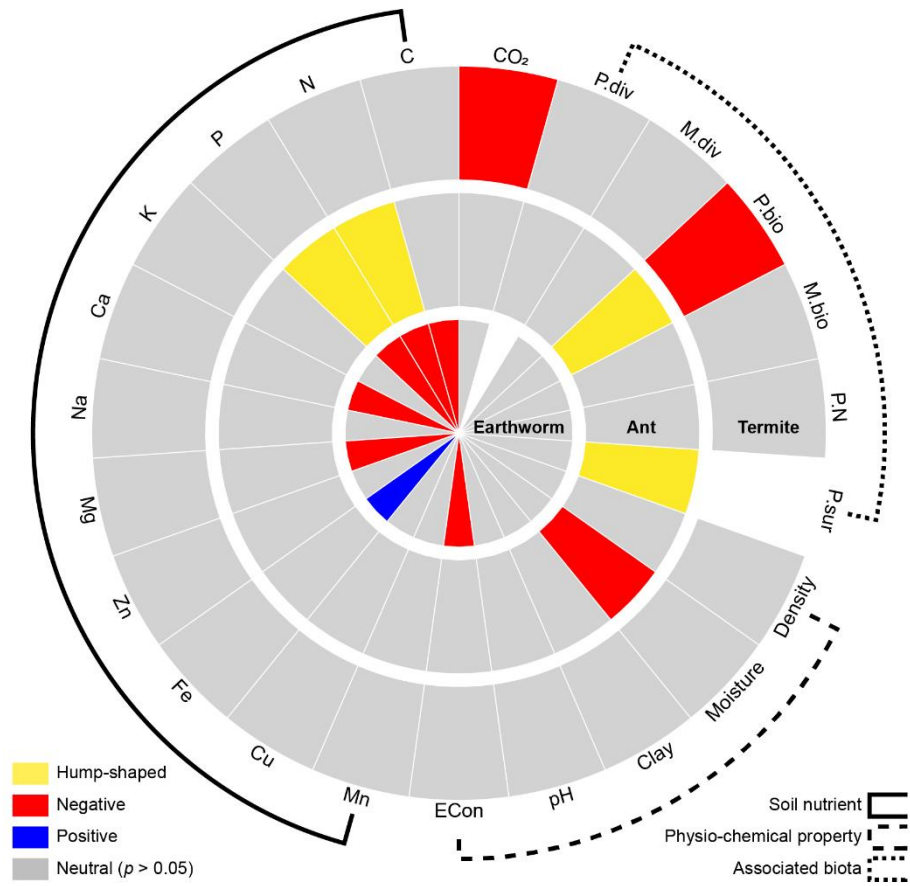
$$f(y, v) \sim \text{intercept} + |\text{Latitude}| + (1 | \text{study})$$

$$\text{Engineering effect} = \text{Ln} (\text{Bioturbated soil} / \text{Reference soil})$$



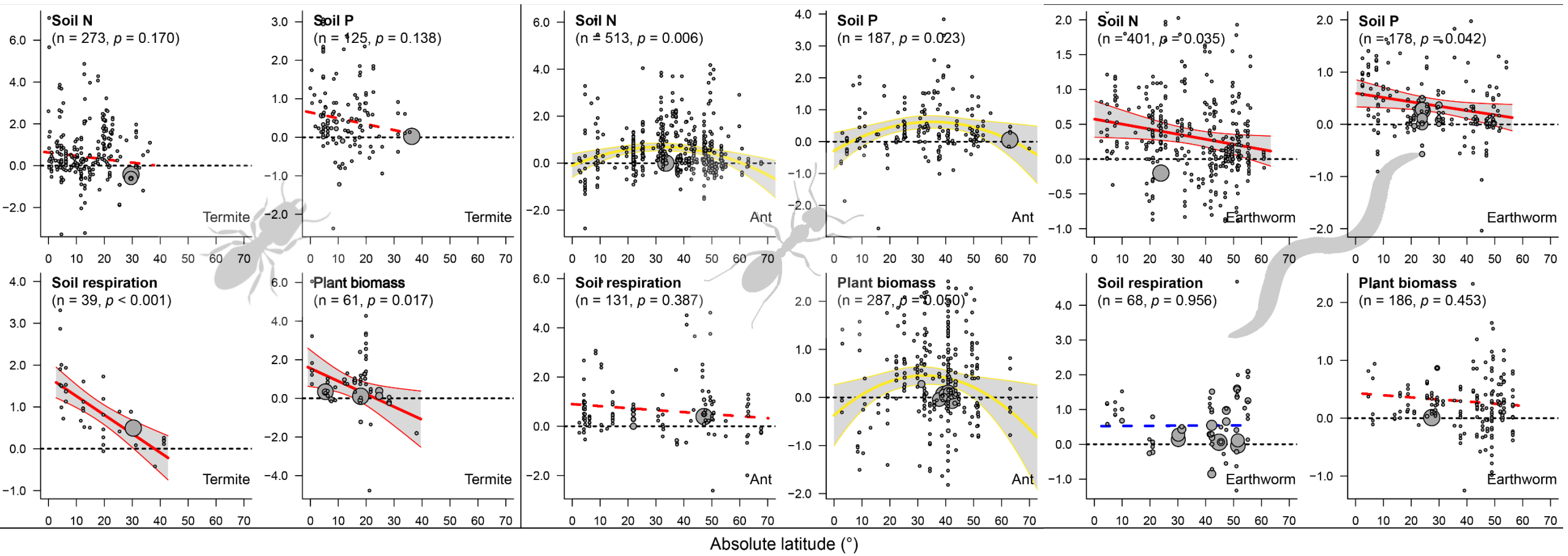
## 生态系统理论 vs. 代谢生态学理论

# 问题二：工程师效应地理格局的驱动机制解析



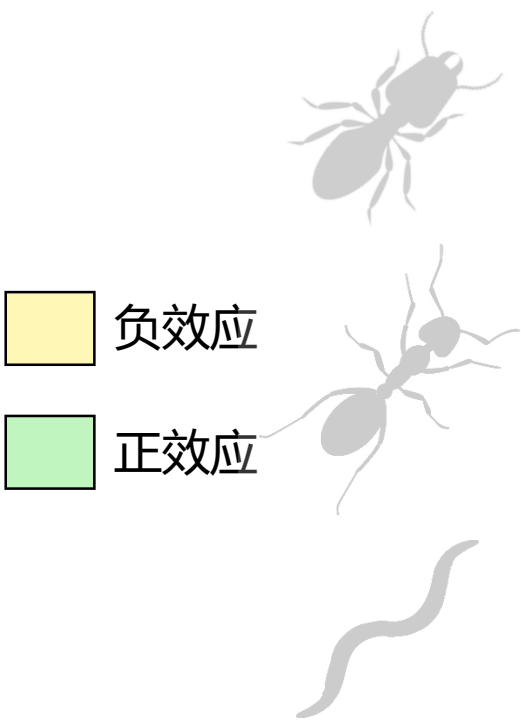
白蚁和蚯蚓的工程师效应主要表现出线性的纬度梯度格局；蚂蚁则主要为单峰型格局

# 问题二：工程师效应地理格局的驱动机制解析

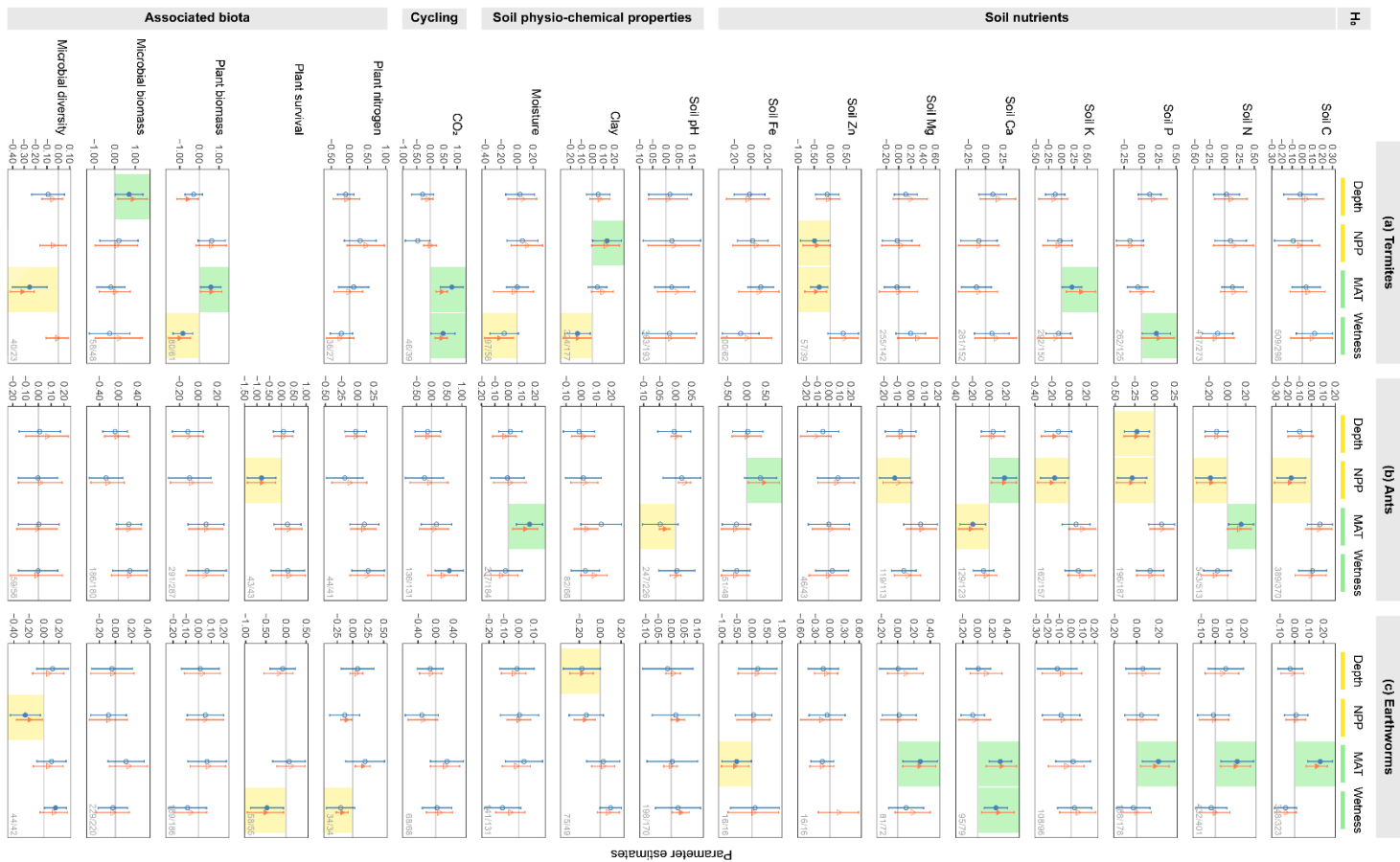


白蚁和蚯蚓的工程师效应在热带最强；蚂蚁则在温带地区最强

## 问题二：工程师效应地理格局的驱动机制解析



负效应  
 正效应



资源驱动

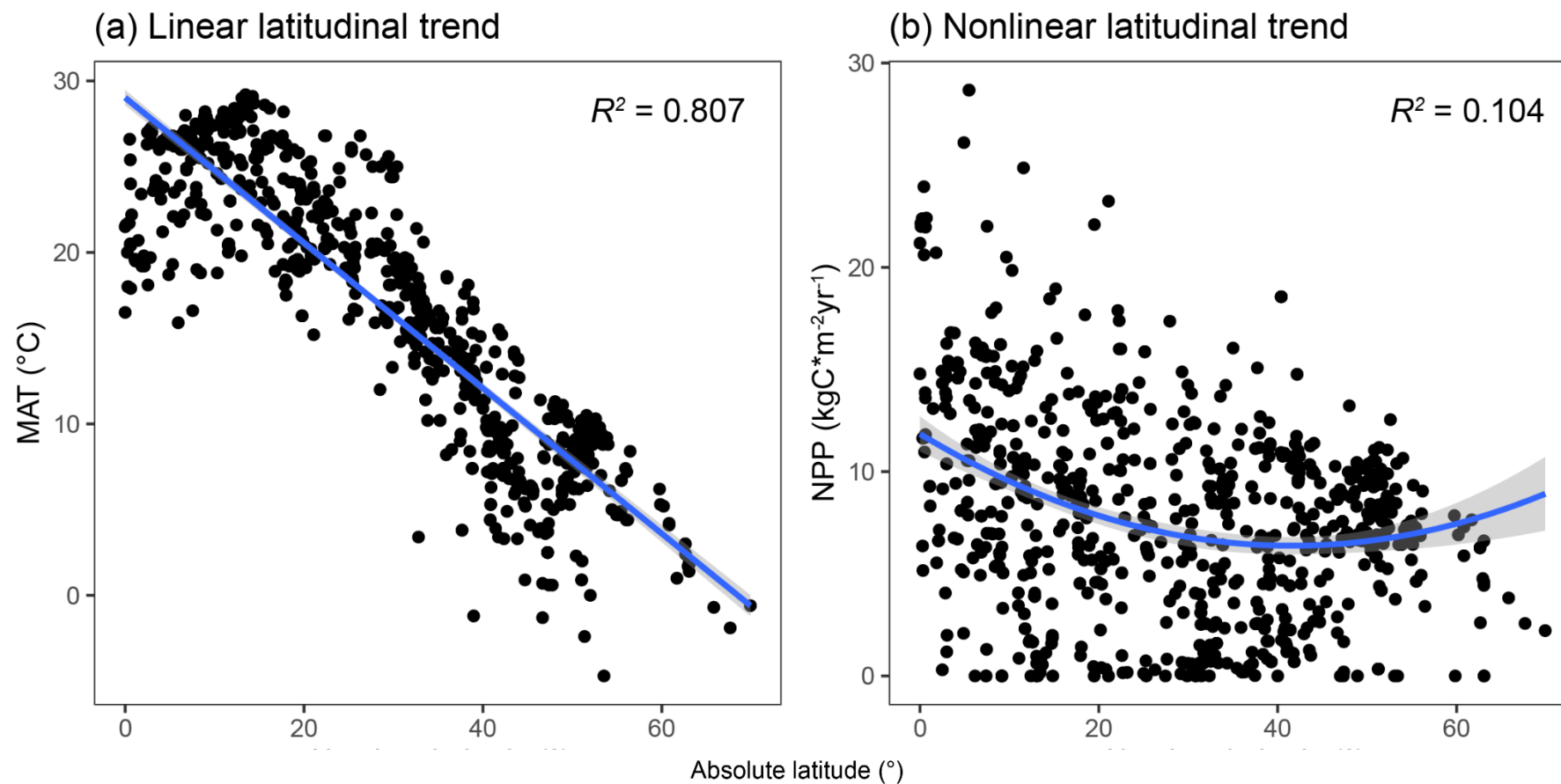
Depth 土壤厚度  
NPP 净初级生产力

代谢驱动

MAT 年均温  
Wetness 降水/蒸散

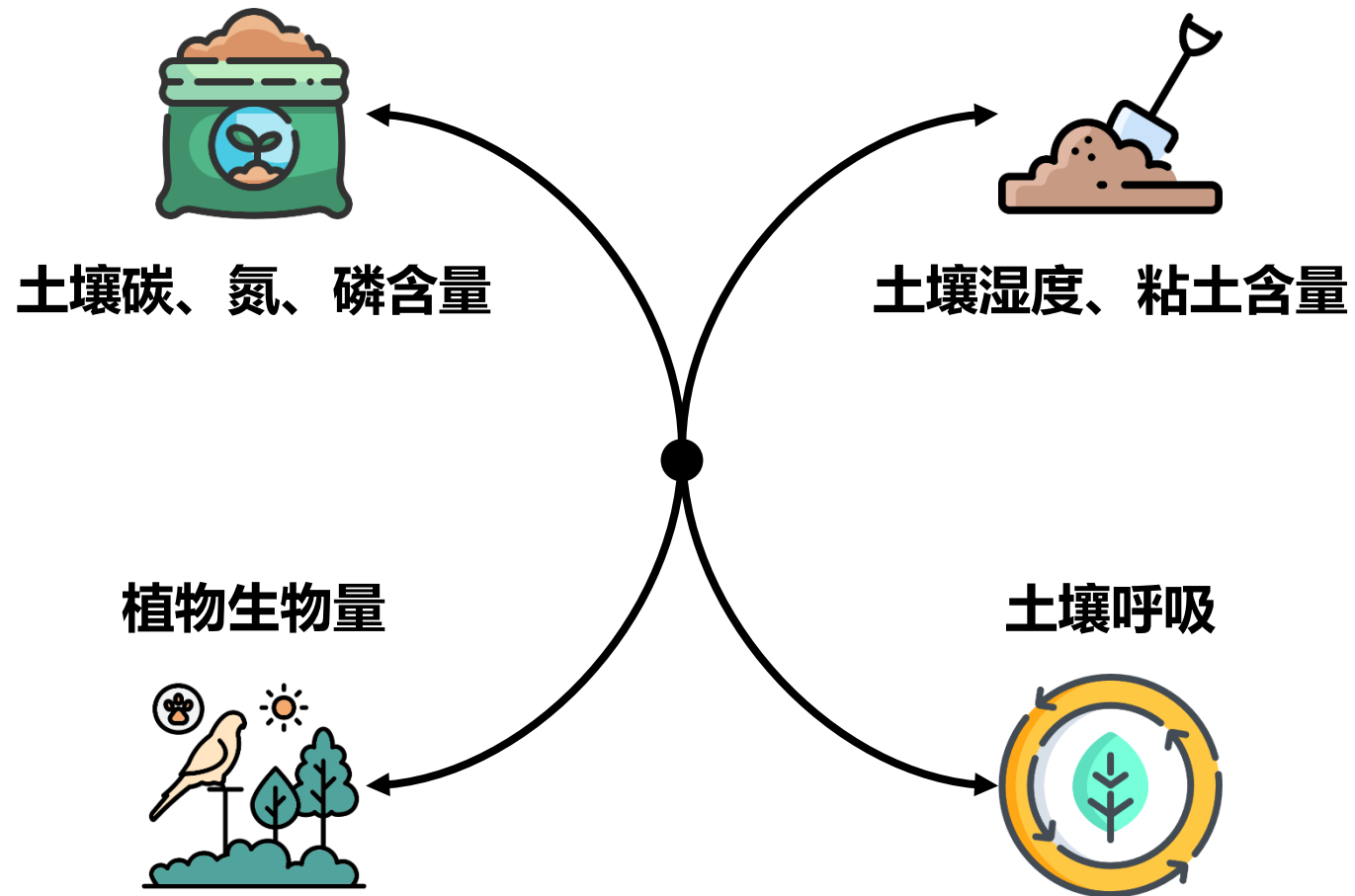
白蚁和蚯蚓工程师效应的地理格局主要受代谢 (MAT+Wetness) 驱动; 蚂蚁则主要由资源 (NPP) 驱动

## 问题二：工程师效应地理格局的驱动机制解析



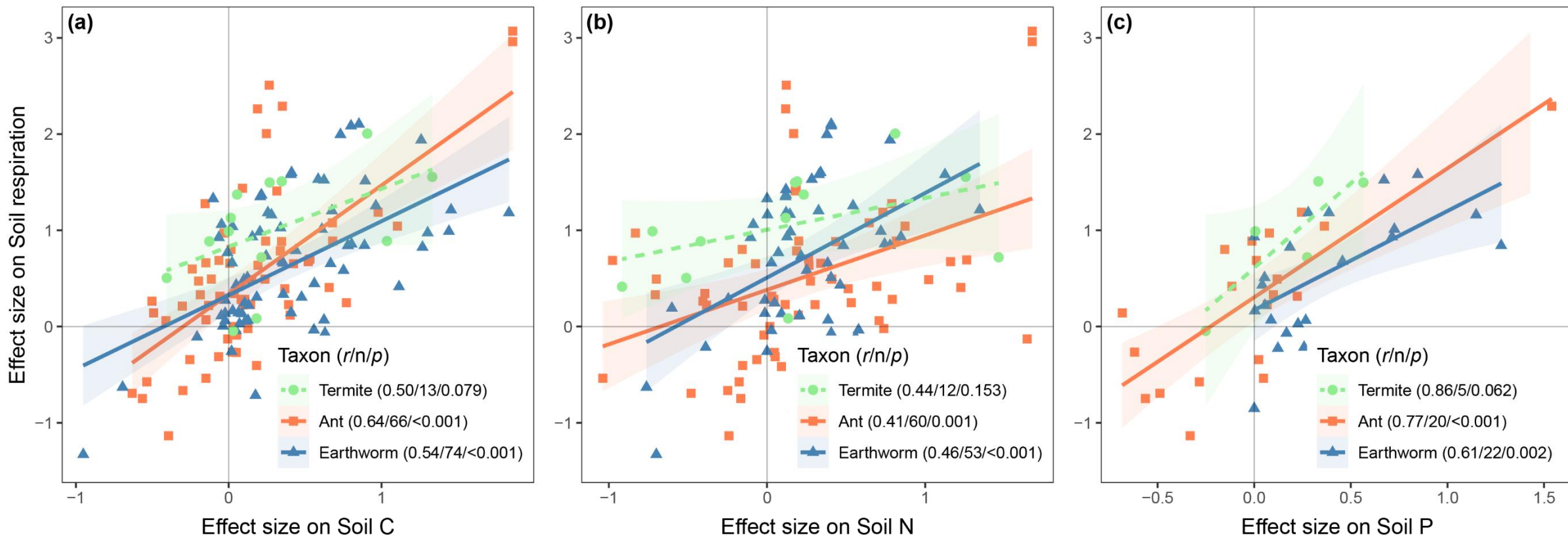
白蚁和蚯蚓的线性格局主要受温度驱动；蚂蚁的单峰格局主要受生产力驱动

# 问题三：不同生态系统功能的工程师效应的关联性



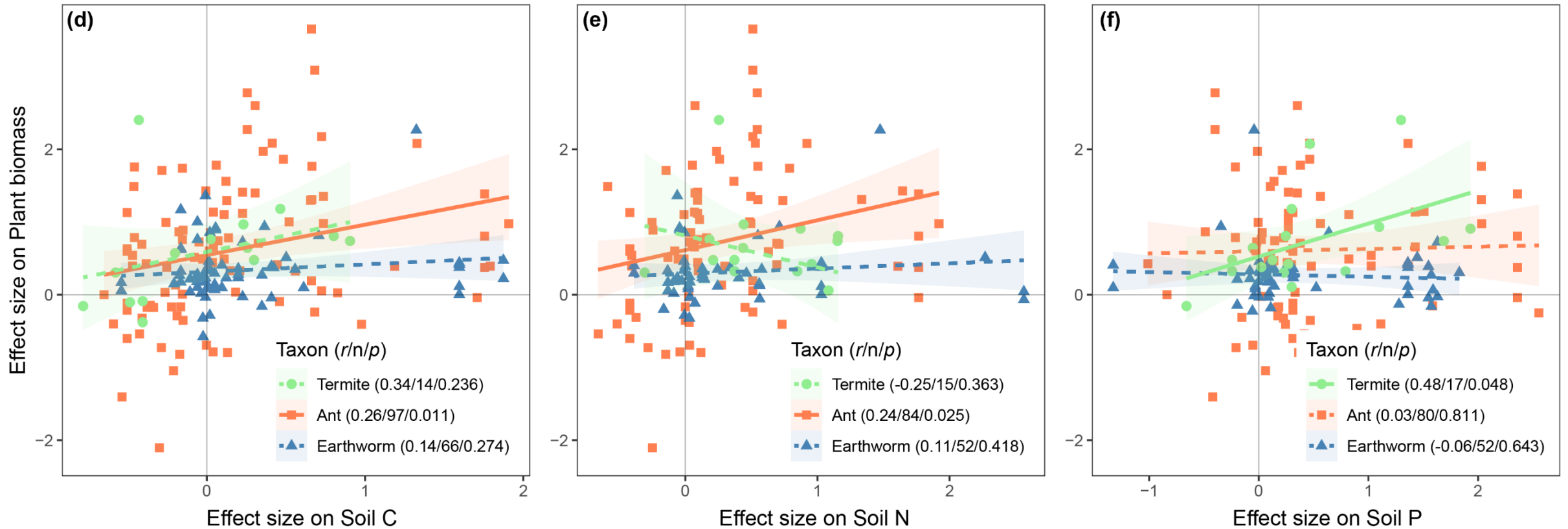
土壤无脊椎动物对土壤元素和土壤性质的改善，能否促进植物生物量和土壤呼吸等碳循环过程？

# 问题三：不同生态系统功能的工程师效应的关联性



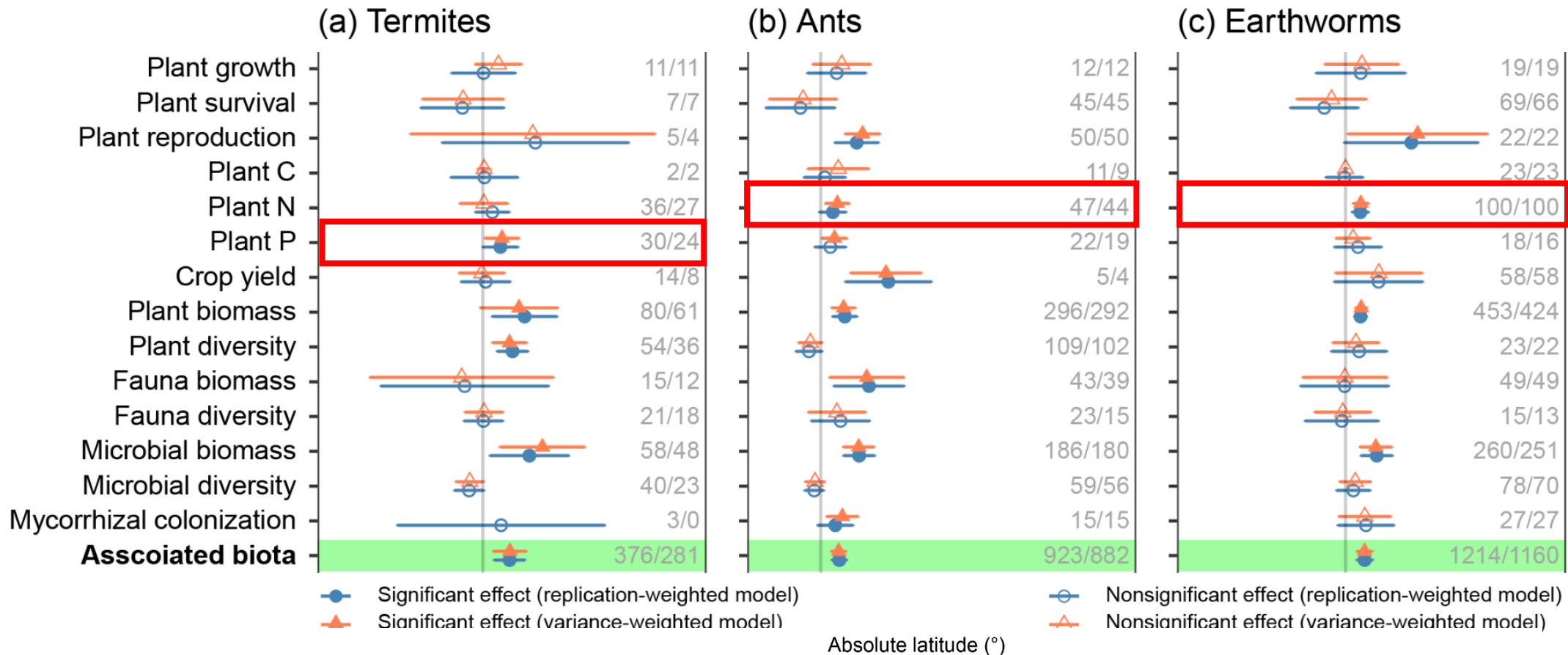
三个土壤动物类群对碳、氮、磷元素含量的提升，也会促进对土壤呼吸的增强作用

# 问题三：不同生态系统功能的工程师效应的关联性



蚂蚁对植物生物量的促进作用与土壤氮含量的提升有关；白蚁则与土壤磷含量的提升有关

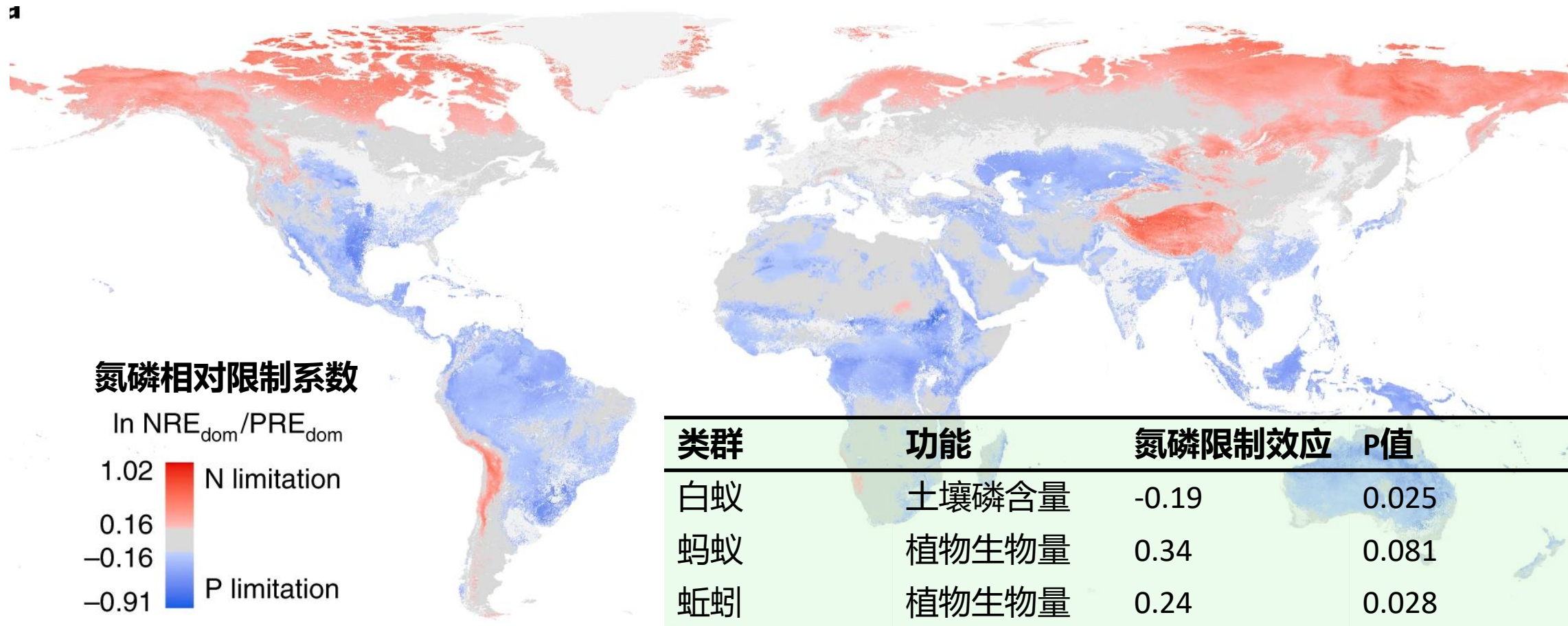
# 问题三：不同生态系统功能的工程师效应的相关性



Associated biota

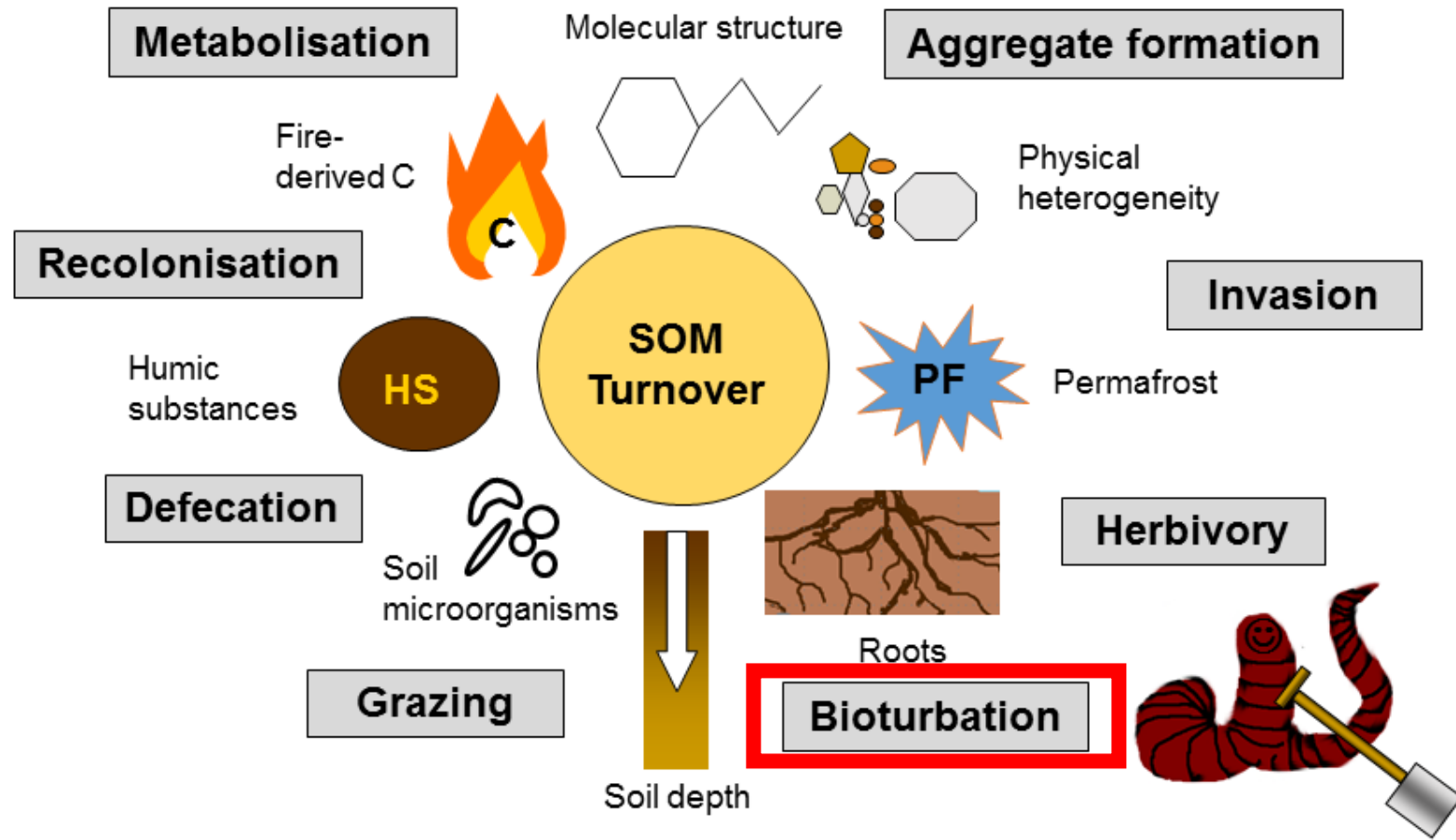
蚂蚁(+27%)和蚯蚓(+21%)仅提升植物氮含量；白蚁(+34%)仅提升植物磷含量

# 问题三：不同生态系统功能的工程师效应的关联性



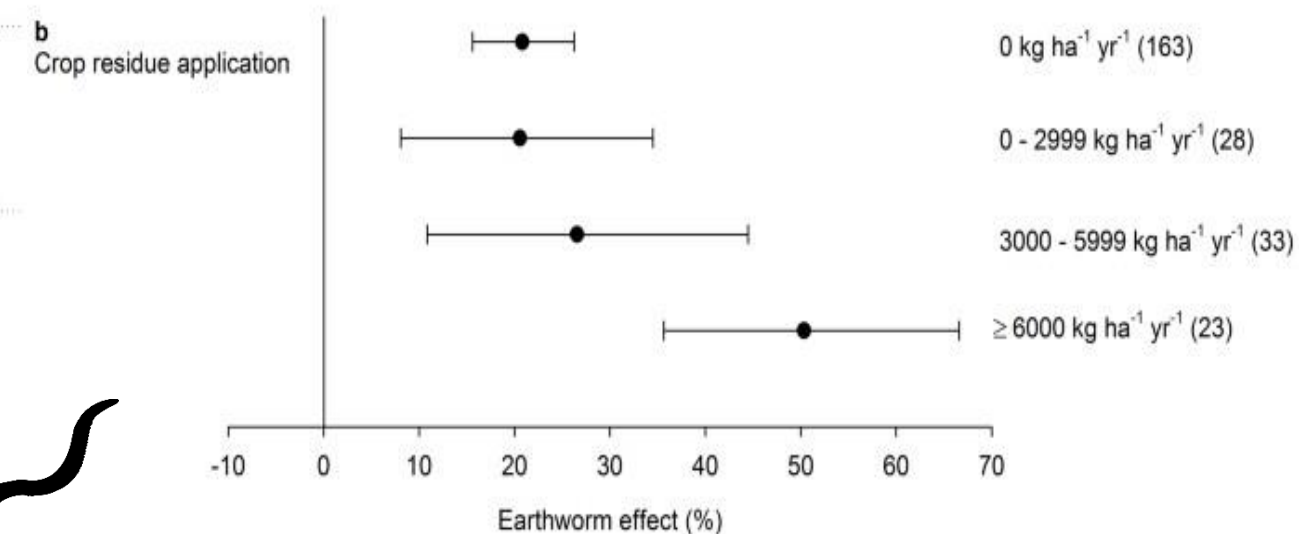
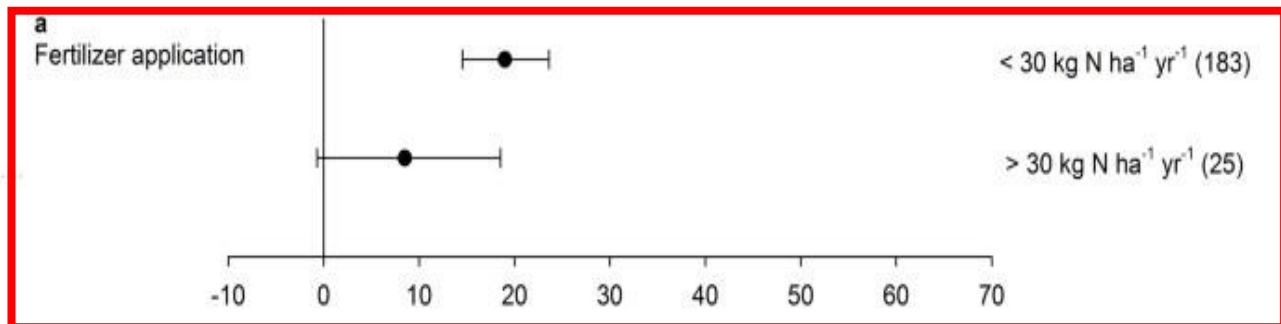
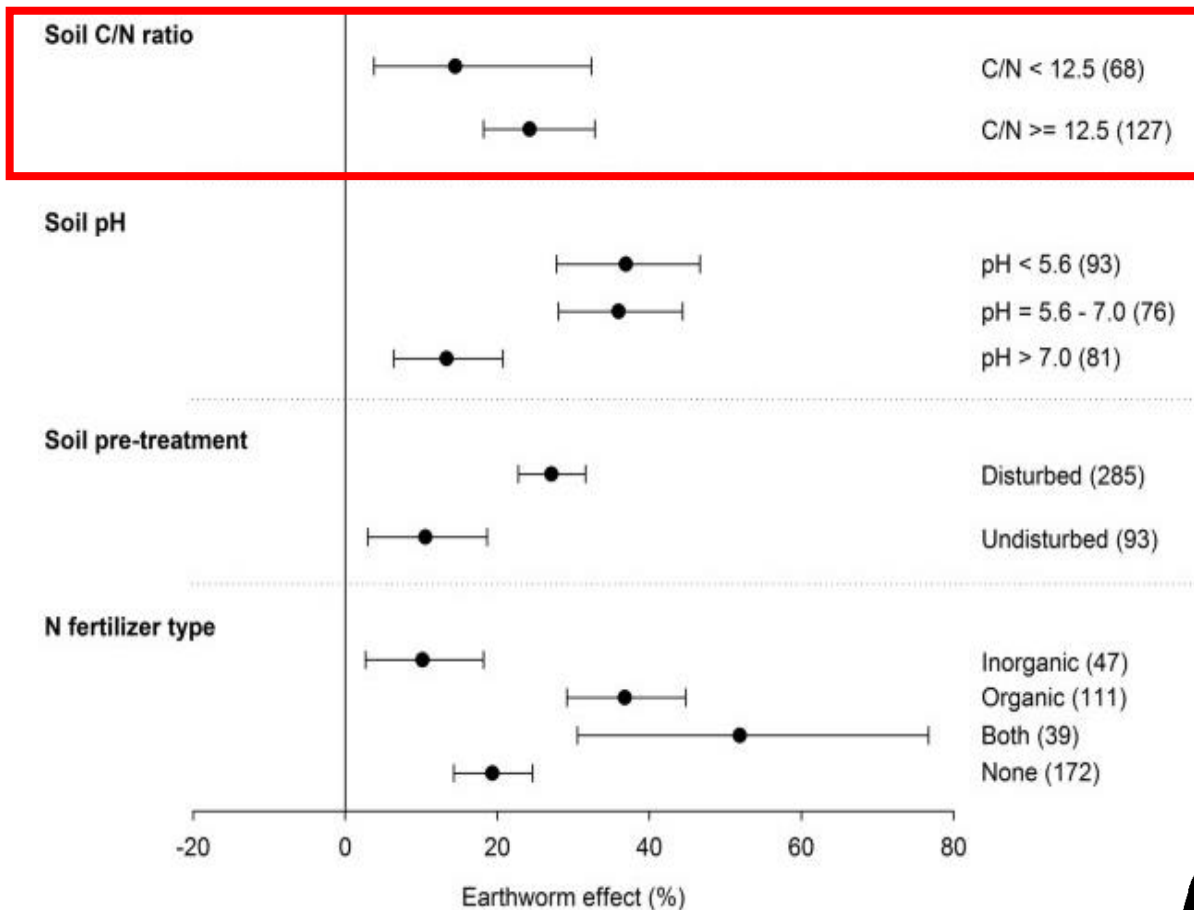
蚂蚁和蚯蚓主要在缺氮的温带地区促进了植物生长；白蚁主要在缺磷的热带地区提升了土壤磷含量

# 土壤无脊椎动物及其生物构造：碳动态模型的改进？



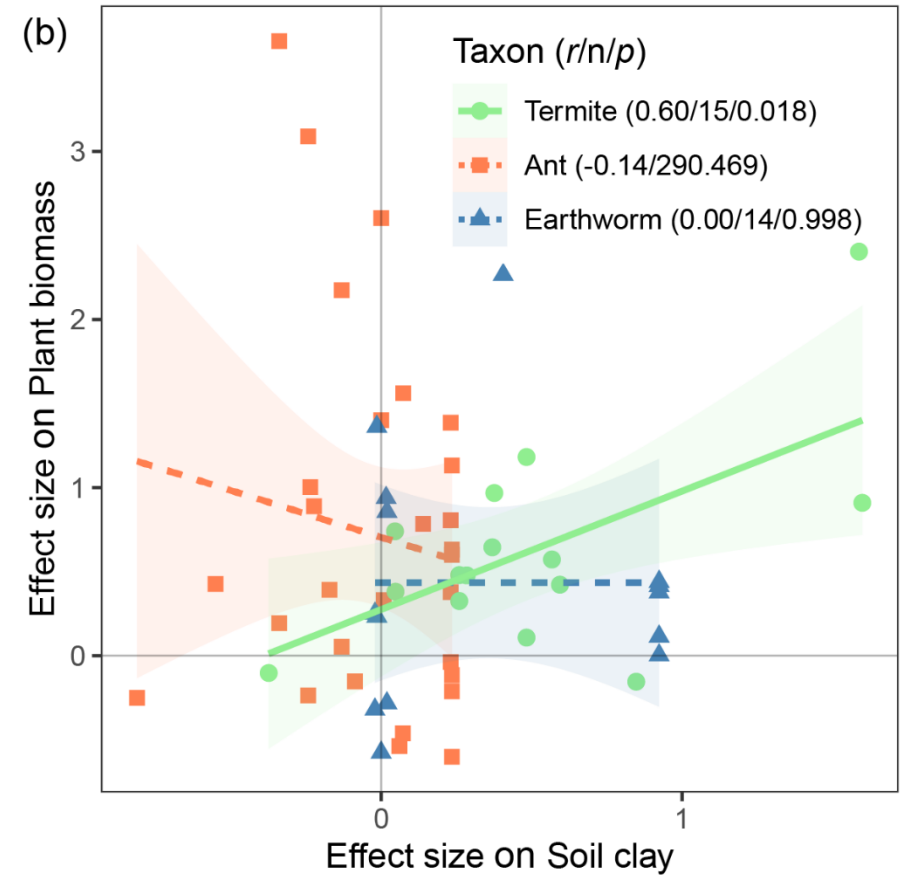
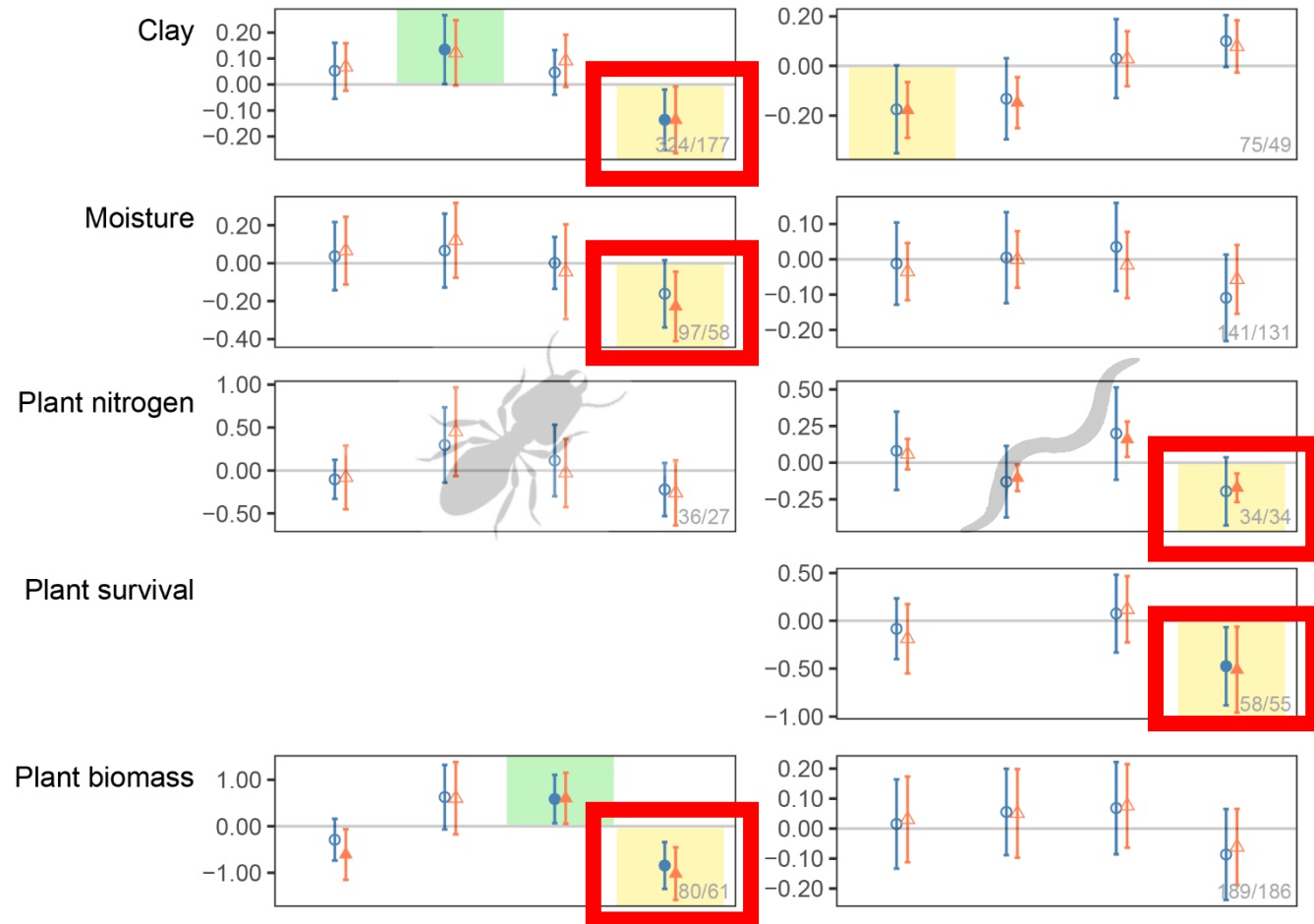
土壤无脊椎动物促进养分富集，进而加快植物碳固定和土壤呼吸。气候变暖可能将加强白蚁对碳循环过程的效应

# 植物-土壤动物互作的地理格局：养分限制驱动



蚂蚁对温带植物生长的促进作用主要通过克服氮养分限制实现，而白蚁则通过克服磷养分限制促进热带植物生长

# 旱区生态系统韧性：白蚁和蚯蚓的积极作用



水分可获性较低的地区，白蚁促进土壤粘土和水分含量进而提升植物生物量；蚯蚓直接提高植物氮含量和存活率

# 土壤动物工程师效应的地理格局及其保护策略仍有待深挖.....

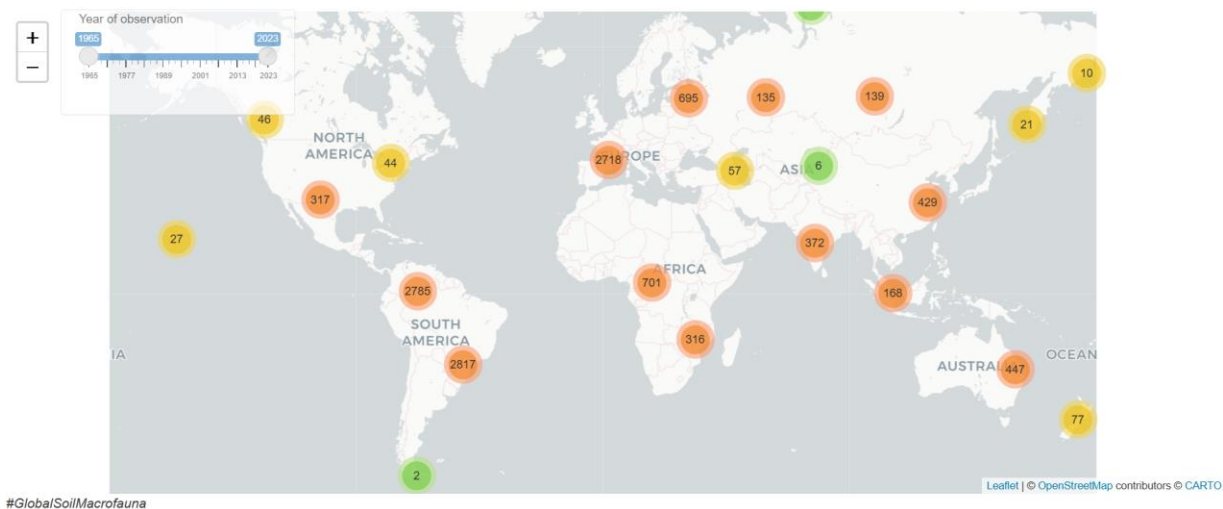
Website navigation menu:

- Welcome!
- Home
- About
- The database
- Join us!
- Funding
- Outreach
- Contact

Designed with BootstrapMade

The MACROFAUNA database <http://www.globalsoilmacrofauna.com/>

Most data come from transects made up of five 25 x 25 cm soil monoliths. The database includes data reported at different resolution: at layer, monolith and transect levels.



45389 Records across the globe

10317 Transects

9883 Soil monoliths with data by layer depth

20828 Soil monoliths

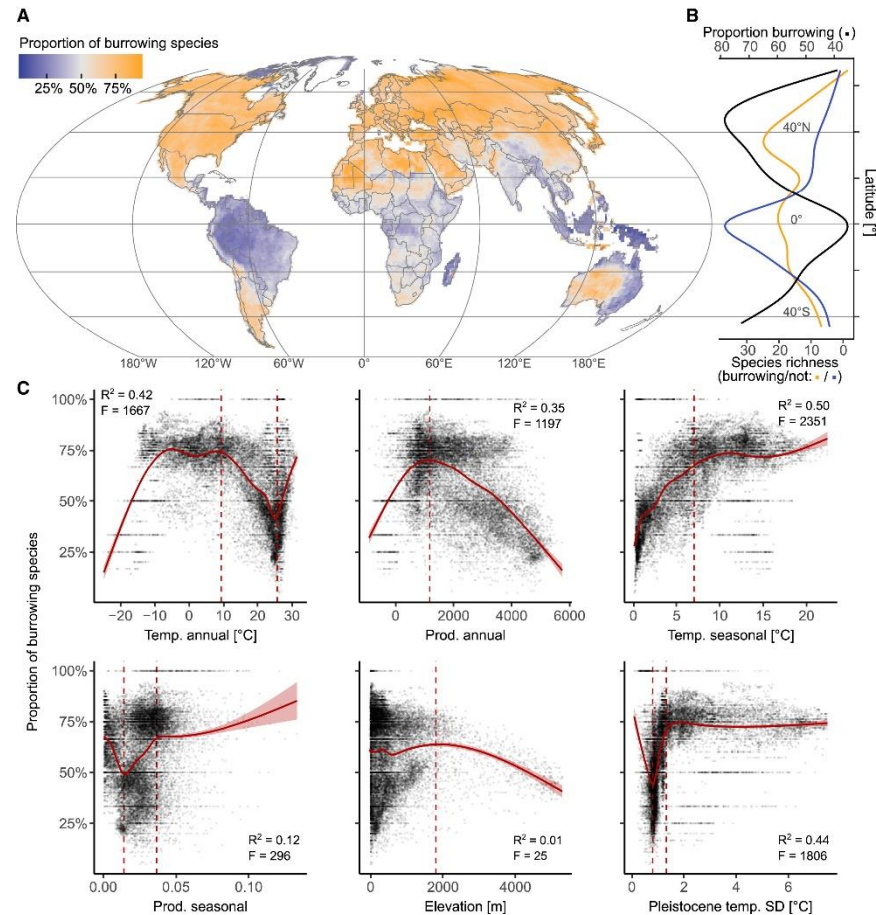
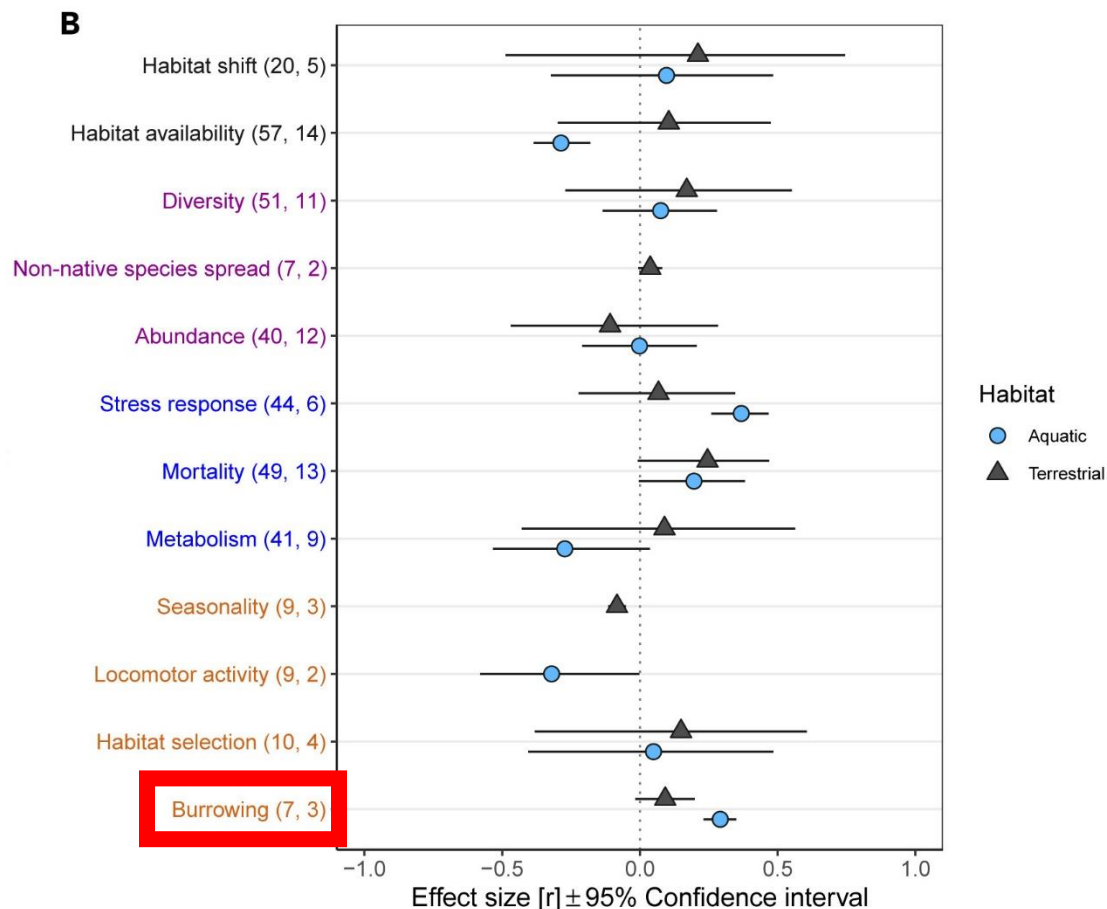
**全球土壤动物分布数据库**  
 一万多条样带  
 17个无脊椎动物类群  
 1km分辨率全球分布图

**关键科学问题1**  
 土壤动物的热点分布区  
 = or ≠  
 工程师效应的热点分布区

**关键科学问题2**  
 土壤动物的关键物种/科属是决定工程师效应的关键，全球变化可能导致工程师多样性丧失

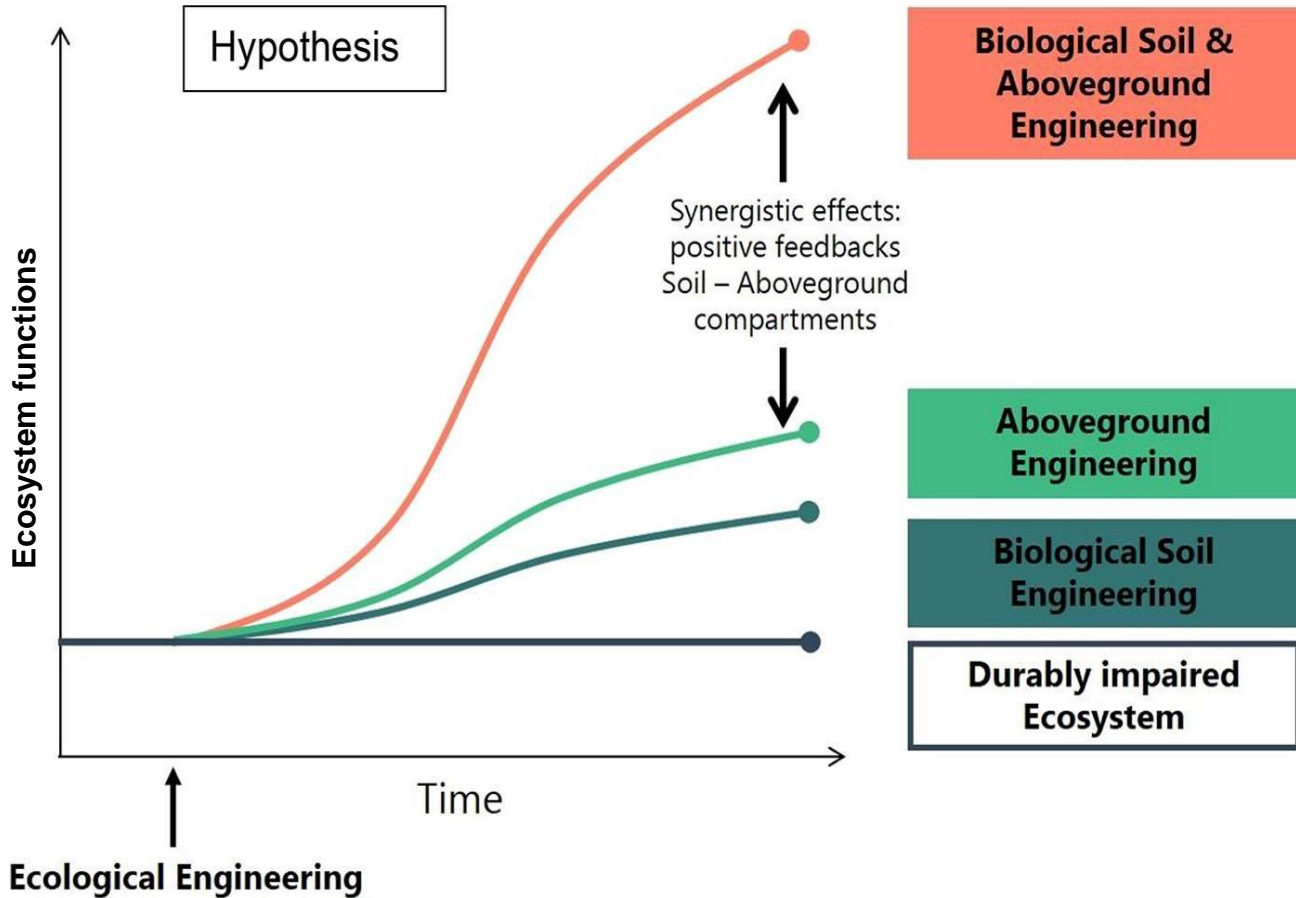
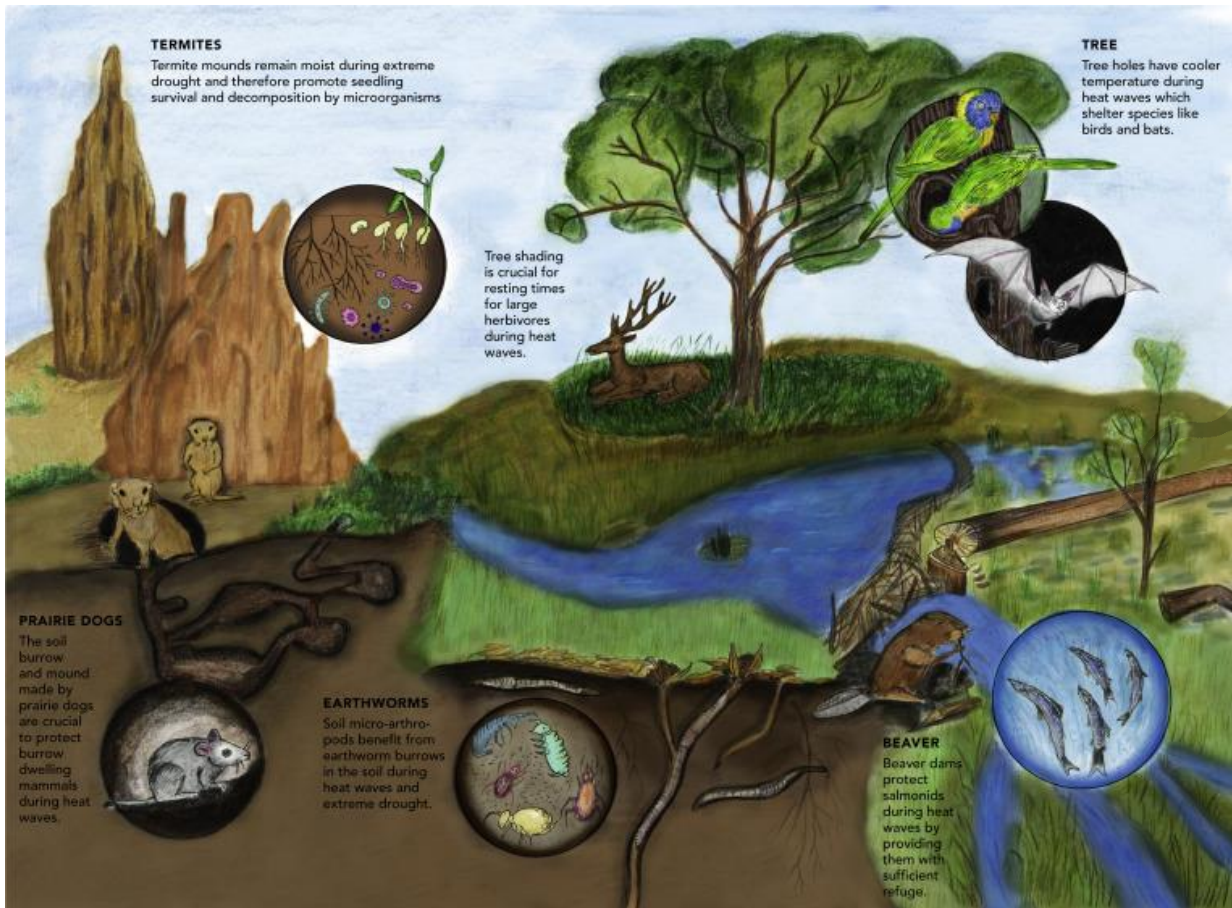
下一步工作：围绕土壤动物“生物多样性-生态系统功能关系”开展更为深入的研究

# 气候变化对土壤扰动作用的影响亟待研究



动物掘土本身即是对抗不利气候而进化出的复杂行为，全球气候变化必将重塑局域土壤扰动和大尺度分布格局

# 探索基于生态系统工程师的生态修复之道



地下-地下生态系统工程师的联合作用或许可以极大提升生态修复的效率和进程

# 致谢



中山大学 储诚进教授



浙江大学 于明坚教授



北京师范大学 杜恩在教授



德国科学院院士  
Nico Eisenhauer教授



法国索邦大学  
Jérôme Mathieu教授



国家杰青、重点项目  
& 国家重点研发计划



中山大学生态学院  
储诚进教授研究团队 合照

**感谢邀请，欢迎讨论！**

# 环境因子数据库

- ❑ MAT & MAP WorldClim Version2 (30 arc-seconds)
- ❑ Wetness Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database (30 arc-seconds)
- ❑ NPP New Global MuSyQ GPP/NPP Remote Sensing Products From 1981 to 2018 (3 arc-minutes)
- ❑ Soil depth Global 1-km Gridded Thickness of Soil, Regolith, and Sedimentary Deposit Layers (30 arc-seconds)